

Черенковский водный детектор НЕВОД

А.А. Петрухин

НЕВОД является единственным в мире созданным на базе квазисферических измерительных модулей многоцелевым черенковским водным детектором, предназначенным для исследования всех компонент космических лучей, включая нейтрино, на поверхности Земли. В настоящее время экспериментальный комплекс НЕВОД включает в себя черенковский водный детектор, систему калибровочных телескопов и координатный детектор. Рассматриваются основные этапы развития экспериментального комплекса НЕВОД, направления исследований, полученные результаты, в том числе касающиеся решения мюонной загадки, а также перспективы дальнейшего развития экспериментального комплекса.

Ключевые слова: черенковское излучение, черенковские детекторы, фотоэлектронные умножители, космические лучи, мюоны, каскадные ливни, широкие атмосферные ливни

PACS numbers: 29.40.Ka, 95.55.Vj, 96.50.S–

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505i.0521

Содержание

1. Введение (521).
 2. Типы черенковских водных детекторов (522).
 3. Квазисферические модули (522).
 4. Нейтринный водный детектор НЕВОД (523).
 5. Калориметрические свойства черенковского водного детектора (524).
 6. Комплекс НЕВОД-ДЕКОР (525).
 7. Метод спектров локальной плотности мюонов (525).
 8. Мюонная загадка и возможности её решения (526).
 9. Энерговыделение групп мюонов в черенковском водном детекторе НЕВОД (527).
 10. Дальнейшие перспективы (528).
 11. Заключение (529).
- Список литературы (529).

1. Введение

Черенковские водные детекторы (ЧВД) являются наиболее масштабным примером использования черенковского излучения для проведения фундаментальных и прикладных исследований. Масштабы современных ЧВД измеряются килотоннами (Super-Kamiokande [1]), мегатоннами ("Байкал" [2], ANTARES (Astronomy with a

Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) [3]) и гигатоннами (IceCube [4]). И хотя вода является не лучшим веществом для создания ядерно-физических установок (небольшая плотность и малые атомные номера входящих в неё элементов, близкие величины радиационной и ядерной длин), некоторые её параметры (хорошая прозрачность, дешевизна и возможность использования естественных водных объёмов) делают её практически единственным веществом для создания детекторов массой в несколько десятков, сотен мегатонн и выше.

Эпоха бурного развития ЧВД началась в 1970-х годах, когда потребовались детекторы для исследования нейтрино ТэВ-ных энергий сначала для поиска и оценки массы W-бозона, а затем, когда W-бозон был открыт в коллайдерных экспериментах, для поиска внеземных источников таких нейтрино. Расчёты ожидаемого темпа счёта событий от взаимодействий ТэВ-ных нейтрино показали, что для получения разумной статистики требуется создание детектора массой в несколько сотен мегатонн (проект DUMAND — Deep Underwater Muon And Neutrino Detector [5]).

Следующей проблемой, для решения которой потребовались ЧВД, стал поиск распада протона. Оценки ожидаемого количества распадов показали, что необходимы детекторы массой порядка 1 кт. И хотя детекторы с такой массой могли быть созданы (и были созданы) из других, более тяжёлых, веществ (NUSEX (NUcleon Stability EXperiment) [6], Fréjus [7]), водные детекторы обладали важным преимуществом — практически одинаковой вероятностью регистрации распада протона в любой точке детектора. Были созданы два таких детектора: Kamiokande массой 3 кт [8] и IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) массой 8 кт [9].

А.А. Петрухин. Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",
Каширское шоссе 31, 115409 Москва,
Российская Федерация
E-mail: AAPetrukhin@mephi.ru

Статья поступила 23 марта 2015 г.

2. Типы черенковских водных детекторов

Основным детектирующим элементом для регистрации черенковского излучения заряженных частиц являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ). По структуре их расположения ЧВД разделяются на периферийные и объёмные (решётчатые). В периферийных детекторах ФЭУ, которые размещаются на внутренних стенках водного резервуара, обеспечивают 4 π -геометрию для регистрации черенковского излучения заряженных частиц, приходящих с любого направления. Это обстоятельство имело важное значение для поиска распада протонов, продукты распада которых могли распространяться в любых направлениях. Существенным недостатком периферийных детекторов является ограничение на их размеры, определяемое длиной поглощения черенковского излучения в воде. Если размеры детектора превышают длину поглощения, то начинают появляться зоны с пониженной вероятностью регистрации, а затем и мёртвые зоны.

Детекторы, созданные для поиска распада протона [8, 9], были периферийного типа, так как их размеры $(15-20)^3 \text{ м}^3$ не превышали длины поглощения черенковского излучения в хорошо очищенной воде.

Для нейтринных детекторов более удобными являются решётчатые структуры, которые позволяют создавать детекторы любых размеров простым увеличением количества гирлянд, на которых развешены ФЭУ. Расстояния между фотоумножителями в гирлянде и между гирляндами определяются длиной поглощения черенковского излучения, в то время как число гирлянд не имеет ограничений принципиального характера. Для нейтринных детекторов неактуальна и проблема 4 π -геометрии, так как в них в основном регистрируется поток частиц из нижней полусферы из-за очень высокого фона других частиц (в основном мюонов) из верхней полусферы. В то же время регистрация частиц из верхней полусферы и проведение соответствующих исследований представляют самостоятельный интерес.

Идея создания многоцелевого ЧВД, расположенного на поверхности Земли, для проведения исследований всех основных компонент космических лучей была высказана в 1977 г. на рабочем совещании во Владивостоке, на котором обсуждались вопросы участия советских учёных в реализации проекта DUMAND, а также возможность создания советской установки такого класса. Черенковский водный детектор НЕВОД задумывался, во-первых, как лабораторный прототип будущих установок типа DUMAND, во-вторых, как нейтринный водный детектор (отсюда и аббревиатура НЕВОД [10]) с очень высокой степенью режекции фоновых событий, на уровне 10^{10} , и, в-третьих, как детектор других компонент космических лучей (КЛ), в том числе мюонов (одиночных и групп), и широких атмосферных ливней (ШАЛ). Такой подход оказался плодотворным, и впоследствии был создан детектор Milagro [11], предназначенный для исследования потоков гамма-квантов высоких энергий посредством разделения ШАЛ, вызванных γ -квантами и заряженными частицами первичного космического излучения (ПКИ), по мюонной компоненте, регистрируемой ЧВД. Была предпринята и попытка создания крупномасштабного нейтринного детектора на поверхности Земли (проект NET (Neutrino Telescope) [12]), который, однако, не был реализован.

Согласно поставленным задачам НЕВОД должен был иметь объёмную структуру (как прототип более масштабных детекторов) и в то же время являться 4 π -детектором (для регистрации частиц из верхней полусферы). Для этого требовалось использование либо фотоумножителей со сферическими фотокатодами, либо каких-то комбинаций ФЭУ с плоскими фотокатодами, обеспечивающих изотропный отклик на черенковское излучение.

3. Квазисферические модули

Большинство выпускаемых промышленностью фотоумножителей, а в 1970-е годы — практически все, имели плоский фотокатод. При регистрации направленного черенковского излучения отклик таких ФЭУ зависит от угла падения излучения на плоскость фотокатода, а следовательно, от угла прохождения регистрируемой заряженной частицы относительно ФЭУ. Если учесть, что отклик ФЭУ зависит также от расстояния до трека заряженной частицы, то возникают большие неопределённости в интерпретации результатов измерений. Действительно, отклик фотоумножителя в первом приближении можно записать в виде

$$N(R, \alpha) = N_0 \frac{S \cos \alpha}{R} \exp \left(-\frac{R}{L} \right), \quad (1)$$

где N_0 — число черенковских фотонов, излучённых с единицы длины трека частицы, S — площадь фотокатода, R — расстояние от трека до фотокатода, α — угол падения черенковского излучения на фотокатод, L — длина поглощения черенковских фотонов, усреднённая по их частотному спектру.

Для устранения указанного недостатка были разработаны фотоумножители с полусферическим фотокатодом, отклик которых не зависел от угла прихода черенковского излучения (естественно, в определённых пределах). Такие фотоумножители используются в экспериментах "Байкал" [2] и IceCube [4], главная цель которых — регистрация нейтринных событий из нижней полусферы. В то же время такие, направленные в одну сторону, ФЭУ не обеспечивают хороших условий для регистрации мюонной компоненты КЛ из верхней полусферы.

Для ЧВД, расположенных на поверхности Земли, актуальной является необходимость регистрации частиц, приходящих по направлениям не только сверху и снизу, но и близким к горизонту. Поэтому был сконструирован состоящий из нескольких ФЭУ модуль, который получил название квазисферического модуля (КСМ). Существует несколько возможных структур, состоящих из фотоумножителей с плоским фотокатодом, суммарный отклик которых не зависит от направления черенковского излучения. Таким свойством обладают структуры, в которых фотоумножители расположены в центрах граней и/или в срезанных вершинах правильных многогранников. Их отклик

$$A(R) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{N_0 S}{R} \exp \left(-\frac{R}{L} \right) \cos \alpha_i \right)^2} \quad (2)$$

при значениях R , превышающих размеры модуля, практически не зависит от направления прихода черенков-

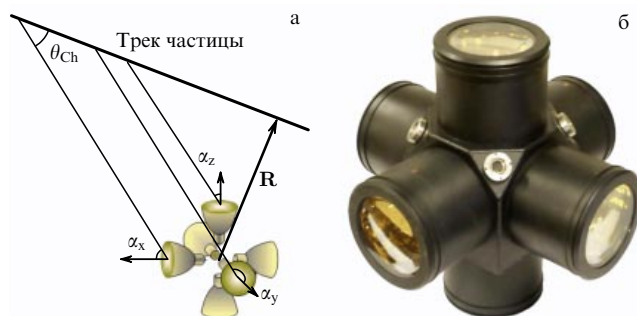


Рис. 1. Квазисферический измерительный модуль: (а) принцип регистрации, (б) внешний вид. θ_{Ch} — черенковский угол.

ского излучения, т.е. от углов α_i . Аналогичным свойством обладает и структура, в которой ФЭУ расположены на рёбрах, но это технически неудобно. Всего известно пять правильных многогранников (тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр), и только первый из них не обладает свойством квазисферичности.

Таким образом, возможны следующие основные комбинации фотоумножителей, образующих квазисферические модули: 6, 8, 12, 14, 20 и 32. Свойство квазисферичности проще всего пояснить на примере устройства КСМ-6, состоящего из шести ФЭУ, ориентированных по осям ортогональной системы координат (или по граням куба). В общем случае черенковское излучение регистрируется тремя ФЭУ (рис. 1а), и если просуммировать квадраты амплитуд зарегистрированных сигналов, то их сумма (или корень квадратный из неё) не будет зависеть от направления черенковского излучения, поскольку $(\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z)^{1/2} = 1$. В общем случае суммарный отклик квазисферического модуля, состоящего из n одинаковых фотоумножителей, пропорционален $(n/6)^{1/2}$.

Первый квазисферический модуль КСМ-6 для черенковских водных детекторов был разработан [13] в 1979 г. Некоторым приближением к квазисферическому модулю являлась разработанная для ЧВД ANTARES [14] структура, в которой использовались три фотоумножителя, направленных в нижнюю полусферу под углом 75° друг к другу. На основе полученного опыта для более масштабного проекта — с объёмом 1 км^3 (КМЗ) — был разработан модуль КСМ-32, в котором один из ФЭУ отсутствует, так как в этом месте осуществляется ввод соединительного кабеля [15]. Создание ЧВД из таких модулей обеспечивает практически полную 4π -геометрию и одинаковые условия регистрации частиц с любого направления.

4. Нейтринный водный детектор НЕВОД

На основе разработанных квазисферических модулей КСМ-6 (рис. 1б) был создан первый в мире многоцелевой ЧВД на поверхности Земли массой 2 кт и размерами водного резервуара $26 \times 9 \times 9 \text{ м}^3$ [10] для решения, в частности, амбициозной задачи — доказательства возможности регистрации нейтрино на поверхности Земли в условиях очень высокого фона атмосферных мюонов (2×10^{10}).

В 1994 г. была введена в эксплуатацию первая часть ЧВД НЕВОД, состоящая из 25 гирлянд (по три или

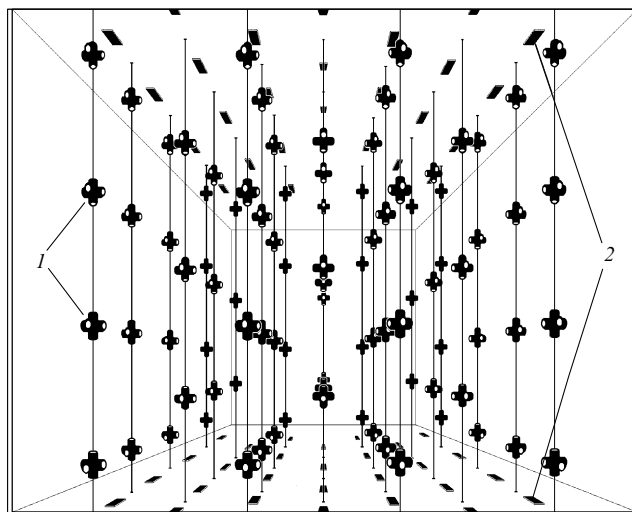


Рис. 2. Пространственная решётка черенковского водного детектора НЕВОД: 1 — квазисферические модули, 2 — сцинтилляционные счётчики системы калибровочных телескопов.

четыре КСМ в каждой) (рис. 2) и имеющая внутренний чувствительный объём, по форме близкий к кубу, с размерами $6 \times 6 \times 7,5 \text{ м}^3$. Для калибровки фотоумножителей во время длительной эксплуатации использовалась система калибровочных телескопов (СКТ), состоящая из 80 сцинтилляционных счётчиков, половина из которых размещалась на крышке водного бассейна, а другая половина — на его дне (см. рис. 2). Помещённые в водонепроницаемые корпуса счётчики размерами $40 \times 20 \times 2 \text{ см}^3$, расположенные в шахматном порядке, обеспечивали выделение 1600 различных траекторий мюонов внутри водного объёма ЧВД.

Отклик КСМ на черенковское излучение мюонов с известными треками был использован для оценки коэффициента режекции отдельного КСМ. Для этого с помощью СКТ были измерены вероятности правильного определения направления прихода черенковского излучения (p), ошибочного (q) и отсутствия информации о его направлении (r) [16]. Эти величины связаны соотношением $p + q + r = 1$. Измеренные распределения параметров p и q дали следующие значения средних величин: $\langle p \rangle = 0,83$, $\langle q \rangle = 0,023$. Коэффициент режекции, который определяется отношением p/q , в среднем на один КСМ составляет ≈ 20 . Для выделения нейтринных событий необходимо значение коэффициента режекции 2×10^{10} . Соответственно, минимальное превышение Δ количества модулей, указывающих правильное направление, над числом модулей, указывающих неверное направление, определяется соотношением $20^{\Delta} > 2 \times 10^{10}$, $\Delta > 8$.

На рисунке 3а приведён пример регистрации мюона из верхней полусферы, для которого число модулей, указывающих правильное направление (сверху), $N_u = 8$, а ошибочное (снизу) — $N_d = 0$; на рис. 3б приведён пример регистрации мюона, генерируемого нейтрино из нижней полусферы, — в этом случае ситуация противоположная: $N_u = 0$ и $N_d = 8$ [17].

Всего за четыре месяца в ходе эксперимента были зарегистрированы два надёжно выделенных нейтринных события и два кандидата в нейтринные события [18]. Ожидаемое число мюонов от нейтрино для этого периода составило $2,5 \pm 0,5$.

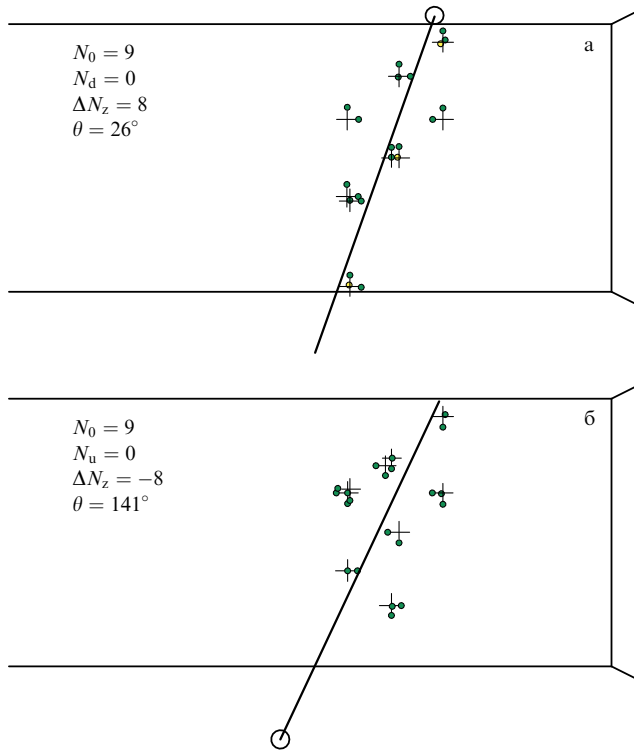


Рис. 3. Образцы двух "зеркальных" событий с одинаковым полным числом сработавших модулей N_0 и одинаковой по абсолютной величине разностью $\Delta N_z = N_u - N_d$ (восстановленные треки мюонов близки по углу и противоположны по направлению): (а) мюон из верхней полусферы, (б) мюон из нижней полусферы (от нейтрино).

5. Калориметрические свойства черенковского водного детектора

Важным преимуществом ЧВД перед многими другими детекторами заряженных частиц являются его калориметрические свойства. Обычно калориметр представляет собой гетерогенную структуру детектирующих элементов, разделённых слоями вещества. При этом интервал и точность измерения энергий определяются количеством и толщиной слоёв. В черенковских калориметрах ситуация иная. С увеличением энергии регистрируемого

каскада возрастает интенсивность черенковского излучения и начинают срабатывать более далёкие фотоумножители (или созданные из них модули). При этом соответствующие расстояния до оси регистрируемого каскада могут варьироваться в широких пределах, что в свою очередь приводит к увеличению числа измеряемых точек на каскадной кривой.

Исследование каскадных ливней, генерируемых мюонами космических лучей в ЧВД НЕВОД, было проведено при двух условиях отбора. В первом случае изучались каскады с известным направлением их осей, которые с хорошей точностью соответствовали трекам мюонов, определяемым независимыми детекторами. Во втором случае каскадные ливни отбирались по суммарному энерговыделению в ЧВД.

В первом случае задача сводилась к определению двух параметров теоретической каскадной кривой: энергии каскада ε и его положения на треке мюона, в качестве которого могут быть выбраны начало каскада, или его максимум, или центр тяжести. При использовании в качестве параметра точки начала каскада t_0 каскадная кривая может быть аппроксимирована следующим образом [19]:

$$N(\varepsilon, t) = \frac{0,32}{\sqrt{y}} \exp[(t - t_0)(1 - 1,5 \ln s)], \quad (3)$$

где $y = \ln(\varepsilon/\beta)$, $\beta = 78,3$ МэВ — критическая энергия электронов в воде, $s = 3(t - t_0)/(t - t_0 + 2y)$ — возраст ливня.

Для получения каскадных кривых были использованы ливни, генерируемые мюонами окологоризонтального потока космических лучей, прошедшими вдоль водного детектора. За 7945 ч было зарегистрировано 1,7 млн мюонов, которые образовали 123364 каскада с энергией выше 1 ГэВ. Все каскады были разделены на шесть групп по логарифмической шкале их энергий со среднелогарифмическими значениями: 3,16; 10; 31,6; 100; 316 и 1000 ГэВ.

На рисунке 4а приведены каскадные кривые, полученные для этих энергий [20]. Представляет интерес левая часть рисунка, где хорошо видна "подложка", формируемая каскадами малых энергий, вероятность генерации которых увеличивается с возрастанием энергии мюонов.

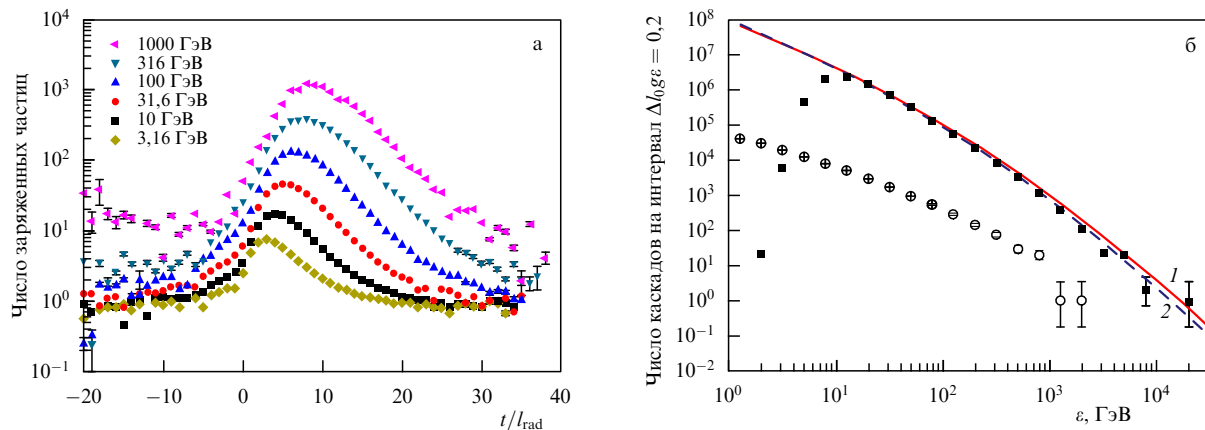


Рис. 4. Экспериментальные данные по каскадам, зарегистрированным в ЧВД НЕВОД. (а) Средние каскадные кривые ливней с энергиями 3,2–1000 ГэВ, l_{rad} — радиационная длина. (б) Спектры каскадных ливней, образованных в воде мюонами; квадраты ($\theta = 50^\circ - 90^\circ$) и кружки ($\theta = 85^\circ - 90^\circ$) — данные эксперимента; кривые 1 и 2 — результаты расчёта для интегрального степенного спектра генерации материнских пионов и каонов в атмосфере с показателями $\gamma = 1,7$ и $\gamma = 1,8$ соответственно.

Во втором случае, при отборе событий по суммарному энерговыделению в ЧВД, когда ось каскада неизвестна, задача существенно усложняется по двум причинам: во-первых, большие энерговыделения могут быть вызваны не только каскадами, генерируемыми мюонами, но и каскадами от адронной и электронно-фотонной компонент космических лучей, а также широкими атмосферными ливнями; во-вторых, при восстановлении каскадной кривой появляются ещё четыре неизвестных параметра, характеризующих положение оси каскада: две дополнительные координаты и два угла. В то же время количество таких каскадов примерно на два порядка больше, чем каскадов с известной осью.

На рисунке 46 приведены энергетические спектры каскадных ливней, полученные при двух методах отбора [21]. Актуальность исследования энергетического спектра мюонов в области энергий выше 10 ТэВ обусловлена зарегистрированным в двух экспериментах [22, 23] избытком мюонов сверхвысоких энергий, который представляет собой одну из сторон так называемой мюонной загадки [24].

6. Комплекс НЕВОД-ДЕКОР

ЧВД НЕВОД имеет хорошие калориметрические свойства, но невысокую угловую точность измерения направления движения частиц. Это обусловлено его небольшими размерами, сопоставимыми с размерами КСМ ($\approx 0,5$ м). Поэтому точность угловых измерений составляет $5^\circ - 7^\circ$, что приемлемо при исследовании вертикального потока ($0^\circ - 30^\circ$), когда поток слабо меняется в зависимости от зенитного угла, но совершенно недостаточно при исследовании мюонов под большими зенитными углами ($60^\circ - 90^\circ$), когда поток сильно зависит от зенитного угла.

Чтобы улучшить угловое разрешение и обеспечить возможность регистрации многочастичных событий, вокруг водного бассейна был создан в рамках российско-итальянского проекта координатный детектор ДЕКОР [25] из камер стримерных трубок, разработанных для установки NUSEX [6]. Трубки размерами $9 \times 9 \times 3500$ мм³, которые имеют резистивное покрытие катода и анод в виде 100-микрометровой нити, работают при продуве газовой смесью, состоящей из аргона (25 %), углекислого газа (50 %) и паров n-пентана (25 %). Камеры стримерных трубок смонтированы в модули (плоскости), расположенные вертикально в галереях вокруг водного детектора.

Съём сигналов от стримеров осуществляется с помощью внешних стрипов шириной ≈ 1 см, которые обеспечивают получение двухкоординатной информации с каждой плоскости. Восемь таких плоскостей площадью 8,4 м² образуют супермодуль, который обеспечивает получение до восьми точек в каждой проекции трека частицы и восстановление направления её движения с точностью $0,7^\circ$ и $0,8^\circ$ для проекций зенитного и азимутального углов соответственно. Четыре таких супермодуля размещены с боковой (длинной) стороны бассейна и по два — с торцевых сторон (рис. 5).

На рисунке 5 приведён также пример регистрации одного мюона супермодулями, расположенными на противоположных торцевых сторонах ЧВД НЕВОД. Такие события, называемые однотрековыми (one-track), используются для калибровки фотоумножителей КСМ, в

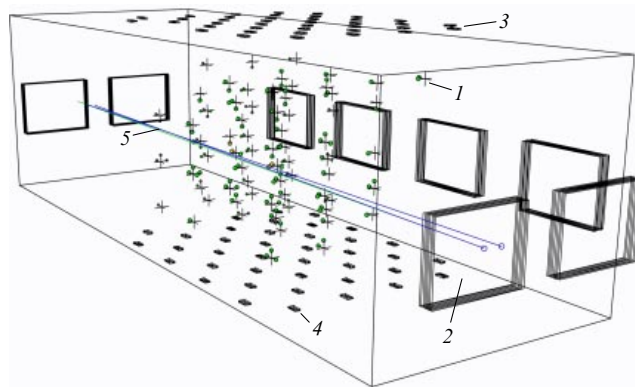


Рис. 5. Комплекс НЕВОД-ДЕКОР: 1 — квазисферические модули, 2 — супермодули координатного детектора, 3 и 4 — счётчики верхней и нижней плоскостей СКТ, 5 — пример однотрекового события.

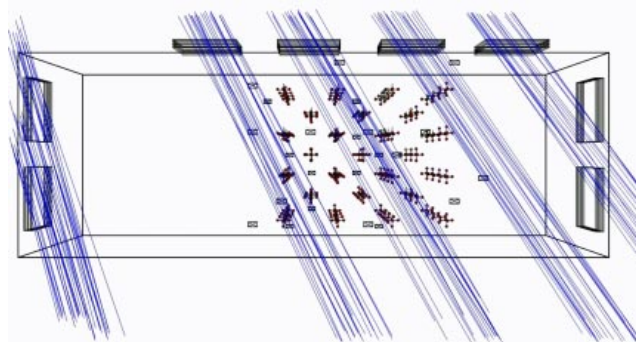


Рис. 6. Пример экспериментального события с группой мюонов в комплексе НЕВОД-ДЕКОР (геометрическая реконструкция, вид сверху).

частности, направленных вниз, которые не могут быть прокалиброваны от счётчиков СКТ.

Но наибольший интерес представляет собой регистрация многомюонных событий (групп мюонов) под большими зенитными углами (рис. 6). Из рисунка хорошо видно, что ДЕКОР регистрирует лишь часть частиц, проходящих через черенковский водный детектор. Однако, учитывая, что размеры детектора много меньше размеров наклонных ШАЛ, плотность мюонов в пределах установки можно считать постоянной — сравнение количества мюонов, зарегистрированных в различных супермодулях, это подтверждает.

7. Метод спектров локальной плотности мюонов

Изменения в развитии широких атмосферных ливней, приходящих под различными зенитными углами, можно проследить, используя компьютерную программу CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KASCADE) [26], которая позволяет рассчитывать характеристики различных компонент. На рисунке 7а приведены результаты моделирования эффективной площади, занимаемой мюонной компонентой при различных зенитных углах. Обращают на себя внимание два обстоятельства: сильное влияние магнитного поля Земли, которое существенно увеличивает размер ШАЛ, и большая площадь ШАЛ, при угле 85° достигающая величины 6 км². В этой

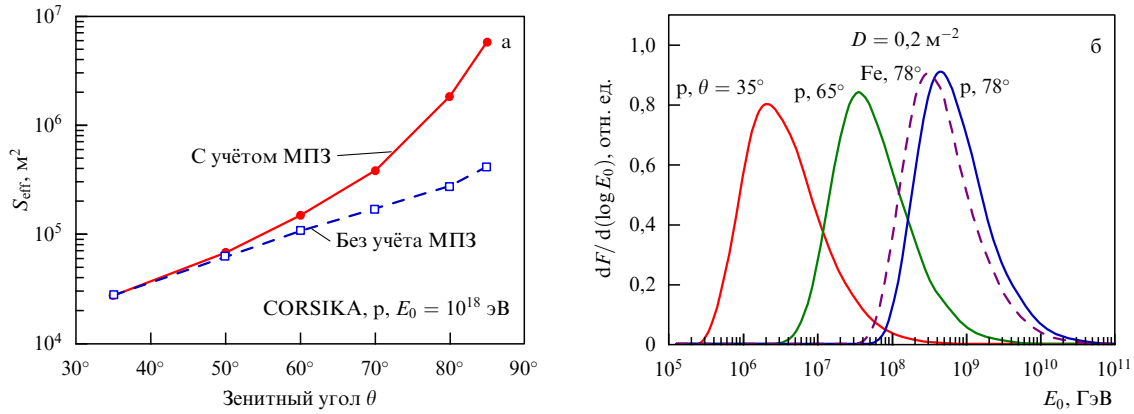


Рис. 7. Результаты моделирования. (а) Эффективная площадь S_{eff} собирания групп мюонов в методе СЛПМ; МПЗ — магнитное поле Земли. (б) Распределение энергий первичных частиц, дающих вклад в события с фиксированной плотностью мюонов. Сплошные кривые — результаты расчёта для протонов (p), штриховая кривая — для ядер железа. Около кривых указаны значения зенитного угла θ .

ситуации детектор с характерными размерами $\approx 100 \text{ м}^2$ действительно можно рассматривать как точечный, пренебрегая возможными изменениями плотности мюонов в его пределах. В этом случае можно ввести понятие локальной плотности мюонов D :

$$D = \frac{m}{S}, \quad (4)$$

где m — множественность мюонов, зарегистрированных в данном событии; S — эффективная площадь детектора под углом прихода мюонов. Тогда спектр локальной плотности мюонов для определённого направления можно представить в виде [27]

$$F(\geq D) = \int N(\geq E(\mathbf{r}, D)) dS, \quad (5)$$

где $\mathbf{r}$ — точка в поперечном сечении ливня по отношению к оси ШАЛ, $N(\geq E)$ — интегральный энергетический спектр первичных частиц с минимальной энергией E , при которой плотность мюонов равна D . Эта энергия находится из уравнения

$$\rho(E, \mathbf{r}) = D, \quad (6)$$

где $\rho(E, \mathbf{r})$ — функция пространственного распределения мюонов (плотность частиц в точке $\mathbf{r}$).

Если предположить, что

$$\rho(E, \mathbf{r}) = \left(\frac{E}{E_0}\right)^\kappa \rho(E_0, \mathbf{r}), \quad (7)$$

где $\kappa \approx 0,9$, то для степенного спектра первичных частиц с интегральным показателем γ

$$N(\geq E) = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \quad (8)$$

из (5)–(8) можно получить следующее приближённое выражение для интегрального спектра локальной плотности мюонов (СЛПМ):

$$F(\geq D) = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-\beta} \int \left(\frac{\rho(E_0, \mathbf{r})}{D_0}\right)^\beta dS, \quad (9)$$

где $\beta = \gamma/\kappa$, D_0 — некоторое нормировочное значение плотности мюонов (в формуле (9) оно сокращается).

Соотношения (6)–(9) позволяют получить оценку вклада различных первичных энергий в события, отбираемые по плотности мюонов под различными углами.

На рисунке 7б хорошо видно изменение интервалов энергий, соответствующих фиксированной плотности мюонов ($D = 0,2 \text{ м}^{-2}$), для разных зенитных углов, которое покрывает три порядка по энергии.

8. Мюонная загадка и возможности её решения

Эксперимент на комплексе НЕВОД-ДЕКОР был проведён в 2002–2007 гг. За 19922 ч было отобрано свыше 40 тыс. событий с множественностью мюонов ≥ 3 . Результаты обработки экспериментальных данных в рамках метода СЛПМ и их сопоставление с результатами моделирования приведены на рис. 8 для четырёх значений зенитного угла [27].

Из рисунка 8а видно, что экспериментальные данные в области энергий $10^{15}–10^{16}$ эВ (зенитный угол 35°) соответствуют нормальному составу космических лучей. Хорошо виден излом энергетического спектра в середине этого интервала (так называемое колено), что свидетельствует о корректности абсолютной привязки метода СЛПМ. С увеличением зенитного угла (рис. 8б, $\theta = 50^\circ$) видно приближение экспериментальных точек к результатам расчётов для железного состава космических лучей. При энергии $\sim 10^{17}$ эВ (рис. 8в) наблюдается второй излом энергетического спектра (второе колено), а массовый состав космических лучей соответствует чистому железу. При дальнейшем увеличении энергии (рис. 8г) экспериментальные данные выходят за пределы возможных оценок потока мюонов в ШАЛ при использовании существующих моделей для чистого железного состава первичных космических лучей. Этот результат был подтверждён в экспериментах, проводимых в ЦЕРНе на установках ALEPH (Apparatus for Large Electron Positron collider pHysics) [28], DELPHI (DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification) [29] и L3-C [30], а также на крупнейшей в мире установке для исследования ШАЛ Pierre Auger Observatory [31].

Проблема избытка мюонов в ШАЛ, возрастающего с увеличением их энергии вместе с уже упомянутым из-

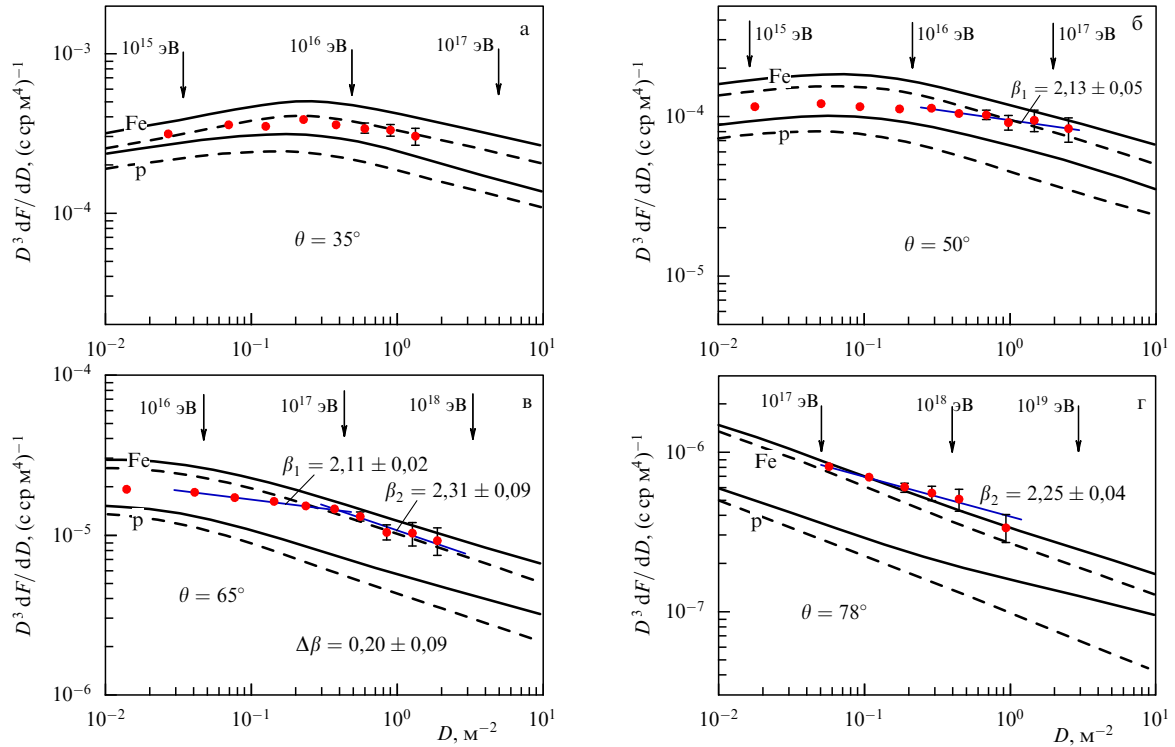


Рис. 8. Экспериментальные и расчётные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов для зенитных углов 35° (а), 50° (б), 65° (в) и 78° (г). Кружки — экспериментальные данные, сплошные кривые — результаты расчёта по модели QGSJET 01 (Quark Gluon String model with JETs), штриховые — по модели SIBYLL. Нижние пары кривых на рис. а–г соответствуют первичным протонам, верхние — ядрам железа.

бытком мюонов сверхвысоких энергий (> 100 ТэВ) в инклюзивном спектре мюонов [22, 23], получила название "мюонная загадка" [24]. Причины такого поведения мюонной компоненты могут быть как космофизического характера (сильное изменение спектра космических лучей и их состава, в том числе за счёт частиц, более тяжёлых, чем ядра железа), так и ядерно-физического (изменение адронного взаимодействия с образованием тяжёлых частиц или состояний материи). В пользу второго варианта свидетельствуют другие аномалии, зарегистрированные в космических лучах: гало, выстроенность, проникающие каскады, кентавры (антикентавры), события с большими поперечными импульсами и т.д., которые не могут быть описаны в рамках существующих моделей адронного взаимодействия [32, 33].

Для объяснения всех наблюдаемых в космических лучах аномалий в работах [34, 35] была предложена модель образования в ядро-ядерных взаимодействиях сгустка кварк-глюонной материи (КГМ) с большим орбитальным моментом. Эффективная масса этого сгустка ~ 1 ТэВ, а величина орбитального момента L может достигать значений $10^3 - 10^4$ [36]. В этом случае такой сгусток можно рассматривать как резонанс с большим центробежным барьером

$$V(L) \sim \frac{L^2}{2mR^2}, \quad (10)$$

где m — масса сгустка КГМ, R — его размер.

Для лёгких кварков высота центробежного барьера будет достаточно велика и соответствующие распады будут сильно подавлены. В то же время для топ-кварков центробежный барьер оказывается небольшим и вероят-

ность их образования и вылета значительно возрастает. Это существенно изменит характер адронного взаимодействия и позволит объяснить все аномальные явления, регистрируемые в космических лучах, в том числе и мюонную загадку.

Экспериментальная возможность разрешения мюонной загадки связана с измерением энерговыделения мюонной компоненты ШАЛ, которое является единственным неисследованным параметром. В случае космофизической природы появления избытка мюонов их удельное энерговыделение в расчёте на один мюон будет слабо зависеть от энергии первичных частиц. В ядерно-физическом варианте зависимость удельного энерговыделения должна измениться за счёт возрастающего вклада высокоэнергичных мюонов.

9. Энерговыделение групп мюонов в черенковском водном детекторе НЕВОД

Эксперимент по измерению энерговыделения групп мюонов был начат в 2012 г. на комплексе НЕВОД-ДЕКОР. С помощью координатного детектора ДЕКОР определялось количество мюонов в группе, а с помощью черенковского водного детектора измерялось энерговыделение в его чувствительном объёме. Обработка результатов эксперимента за 9673 ч регистрации дала следующие результаты [37]. Было зарегистрировано 16416 событий с числом мюонов ≥ 5 в интервале зенитных углов $55^\circ - 90^\circ$. Для изучения поведения энерговыделения при малых углах была проведена обработка событий, зарегистрированных в интервале зенитных углов $40^\circ - 55^\circ$. За 3253 ч было зарегистрировано 15084 события. Удельное энерговыделение оценивалось с учётом множественно-

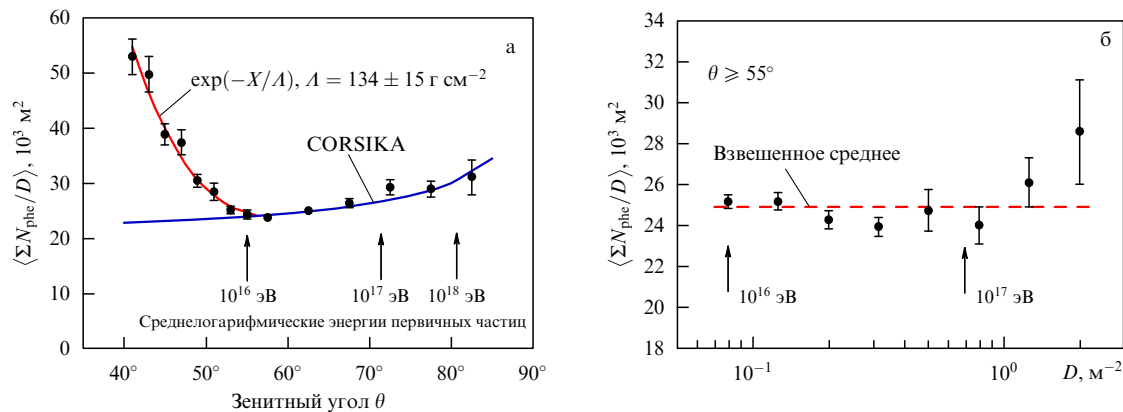


Рис. 9. Зависимость удельного энерговыделения групп мюонов от (а) зенитного угла θ и (б) плотности D мюонов в группах.

сти зарегистрированных частиц и углов их прохождения через ЧВД.

На рисунке 9а представлена зенитно-угловая зависимость удельного энерговыделения (в фотоэлектронах). Хорошо выделяются две области зенитных углов: меньше $\approx 55^\circ$ и больше $\approx 55^\circ$. Первый интервал соответствует поглощению адронной и электронно-фотонной компонент ШАЛ с длиной поглощения $A = 134 \pm 15 \text{ г см}^{-2}$. Второй интервал соответствует энерговыделению чисто мюонной компоненты. Прослеживается возрастание этого энерговыделения, связанное с увеличением средней энергии мюонов в группах при их регистрации под большими зенитными углами, которое соответствует результату расчёта по программе CORSIKA [26]. Для того чтобы оценить возможные систематические искажения, была построена зависимость энерговыделения от азимутального угла. Полученная зависимость не выявила каких-либо аномалий, и в пределах статистических ошибок она может быть описана константой.

Более интересной представляется зависимость удельного энерговыделения от множественности зарегистрированных мюонов (рис. 9б). Хотя статистическая обеспеченность полученных данных невелика, наметившееся возрастание удельного энерговыделения при энергиях первичных частиц более $\sim 10^{17}$ эВ может свидетельствовать в пользу существования какого-то нового источника генерации мюонов высоких и сверхвысоких энергий. Продолжение набора статистики, а также решение некоторых методических вопросов, связанных с измерениями плотности потока мюонов и их энерговыделения в ЧВД НЕВОД, позволят сделать более надёжные выводы.

При обсуждении путей решения мюонной загадки в рамках ядерно-физического подхода неизбежно возникает вопрос о возможности поиска новых частиц (состояний материи), ответственных за её появление, в экспериментах на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider, LHC) [38]. Действительно, область энергий $\sim 10^{16}$ эВ, в которой, по-видимому, находится порог появления новой физики, соответствует диапазону энергий LHC. Однако в космических лучах этот интервал энергий соответствует ядро-ядерным взаимодействиям, а в экспериментах на LHC — протон-протонным, для которых порог образования сгустков кварк-глюонной материи будет существенно выше. Что касается ядро-ядерных взаимодействий, то из-за большой множественности вторичных частиц поиски топ-кварков в таких

взаимодействиях сильно затруднены. Поэтому в ближайшие годы комплекс НЕВОД-ДЕКОР останется единственной в мире установкой, на которой могут быть проведены такие исследования, поскольку на других установках для исследования ШАЛ отсутствует возможность измерения энерговыделения мюонной компоненты.

10. Дальнейшие перспективы

Эксперимент НЕВОД-ДЕКОР по измерению энерговыделения мюонной компоненты наклонных ШАЛ при всей своей уникальности не лишён некоторых недостатков. Во-первых, несплошное перекрытие черенковского водного детектора супермодулями ДЕКОР (см. рис. 6) оставляет некоторую неопределённость в оценке множественности мюонов. И хотя концепция метода СЛПМ исходит из слабо изменяющегося пространственного распределения мюонов на масштабах установки типа ДЕКОР, вполне возможны достаточно большие флуктуации в числе зарегистрированных мюонов, особенно при малых множественностях.

Во-вторых, частичная заполненность водного резервуара измерительными модулями даёт разный отклик на прохождение групп мюонов в различных местах ЧВД. И хотя это обстоятельство можно учесть расчётным путём, разброс в откликах на отдельные события может быть достаточно большим.

В-третьих, неизвестное положение оси ШАЛ относительно экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР приводит к большому разбросу в оценке энергий первичных частиц, ответственных за образование групп мюонов с определёнными множественностью и зенитным углом (рис. 7б).

В настоящее время разработана Программа развития уникальной научной установки "Экспериментальный комплекс (ЭК) НЕВОД", в рамках которой планируется дальнейшее расширение ЧВД и создание новых детекторов. Будет создан новый внешний координатно-трековый детектор ТРЕК на основе дрейфовых камер, использовавшихся ранее в нейтринном детекторе ускорителя У-70 Института физики высоких энергий (ИФВЭ). Эта работа проводится в рамках сотрудничества Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" (НИЯУ МИФИ) с ИФВЭ [39]. Площадь новой установки составит 260 м^2 и перекроет всю боковую сторону ЧВД. При этом точность разделения треков мюонов улучшится от 3 см в существующем детекторе

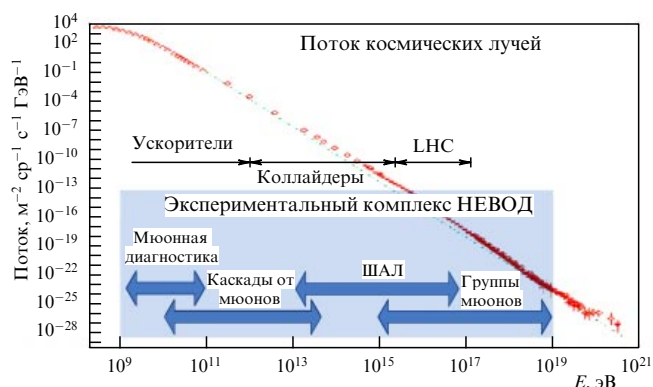


Рис. 10. Энергетические интервалы различных методов, используемых в экспериментальном комплексе НЕВОД для регистрации космических лучей.

до 0,3 см в новом детекторе, что позволит получить более достоверные данные по множественности мюонов в области сверхвысоких энергий.

Модернизация черенковского водного детектора будет проведена посредством расширения его детектирующей системы на весь объём водного резервуара. Это снимет проблему зависимости отклика ЧВД от места прохождения частиц. В то же время такой ЧВД может быть использован для исследования энергетического спектра околоразрывного потока космических лучей методом парметра (по измерению каскадов, генерируемых в результате процесса образования электрон-позитронных пар).

Вокруг здания ЭК НЕВОД планируется разместить установку для регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ [40]. Для этой цели будут использованы сцинтилляционные детекторы, ранее работавшие в установках EAS-TOP (Extensive Air Showers (EAS) on TOP of Gran Sasso underground laboratories) [41] и KASCADE-Grande (KArlsruhe Shower Core and Array DETector-Grande) [42]. В соответствии с соглашением между НИЯУ МИФИ и Национальным институтом ядерной физики (INFN, Италия) эти детекторы будут использованы в установке НЕВОД-ШАЛ [40].

Планируется также создание установки для регистрации атмосферных нейтронов (УРАН), которая станет первой в мире крупномасштабной установкой для исследований нейтронной компоненты ШАЛ [43].

После выполнения намеченной программы развития экспериментальный комплекс НЕВОД превратится в научную установку класса меганаука (mega-science) и позволит исследовать практически все компоненты космических лучей в рекордно широком интервале энергий ($10^9 - 10^{19}$ эВ) (рис. 10) и в полном диапазоне зенитных и азимутальных углов.

11. Заключение

Создание черенковского водного детектора НЕВОД открыло новое направление в исследованиях различных компонент космических лучей на поверхности Земли. В отличие от подземных (подлёдных) детекторов, НЕВОД эффективно регистрирует наклонные ливни и околоразрывной поток мюонов. Особенности земной атмосферы предоставляют уникальные возможности для регистрации групп мюонов от первичных частиц с энер-

гией до 10^{19} эВ на установке относительно небольших размеров, а также увеличивают поток высокоэнергичных мюонов вблизи горизонта, которые могут быть зарегистрированы как калориметрическим методом, так и методом парметра.

Созданный на базе ЧВД НЕВОД экспериментальный комплекс, который постоянно развивается, включён в Перечень уникальных научных установок Российской Федерации. После реализации Программы развития в 2015–2020 гг. экспериментальный комплекс НЕВОД станет установкой класса меганаука (mega-science) для проведения фундаментальных, поисковых и прикладных исследований космических лучей с рекордно высокими энергиями — $10^9 - 10^{19}$ эВ — и в полном диапазоне зенитных и азимутальных углов.

Настоящая статья написана на основе результатов, полученных на уникальной установке НЕВОД при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI59114X0002 и государственное задание) и гранта Президента РФ НШ-4930.2014.2.

Список литературы

1. Fukuda S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **501** 418 (2003)
2. Balkanov V A et al. et al. (Baikal Collab.), in *Proc. of the 25th Conf. Intern. Cosmic Ray Conf., Durban, South Africa, 30 July–6 August, 1997* Vol. 7 (Durban, 1997) p. 21
3. Ageron M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **656** 11 (2011)
4. Achterberg A et al. (IceCube Collab.) *Astropart. Phys.* **26** 155 (2006)
5. Roberts A, Wilkins G A (Eds) *Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop, La Jolla, Calif., July 24–September 2, 1978* (La Jolla, Calif.: DUMAND, Scripps Institution of Oceanography, 1979)
6. Battistoni G et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **245** 277 (1986)
7. Berger Ch et al. (Fréjus Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **262** 463 (1987)
8. Nakamura K et al., in *Physics and Astrophysics of Neutrinos* (Eds M Fukugita, A Suzuki) (Tokyo: Springer-Verlag, 1994) p. 249
9. Becker-Szendy R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **324** 363 (1993)
10. Abin A V et al., in *21st Intern. Cosmic Ray Conf., Adelaide, Australia, 1990, Conf. Papers* Vol. 10 (Ed. R J Protheroe) (Northfield: Department of Phys. and Math. Phys., The Univ. of Adelaide, Graphic Services, 1990) p. 234
11. Atkins R et al. (The Milagro Collab.), astro-ph/0110513
12. Bobisut F et al., in *3rd Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, February 26–28, 1991* (Ed. M Baldo Ceolin) (Venice, 1991) p. 387
13. Borog V V et al., in *16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 380
14. Amram P et al. (The ANTARES Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **484** 369 (2002)
15. Adrián-Martínez S et al. *Eur. Phys. J. C* **74** 3056 (2014)
16. Aynutdinov V M et al., in *6th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, 1994* (Ed. M Baldo Ceolin) (Venice, 1994) p. 565
17. Aynutdinov V M et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **70** 489 (1999)
18. Aynutdinov V M et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **66** 235 (1998)
19. Greisen K, in *Progress in Cosmic Ray Physics* Vol. 3 (Ed. J G Wilson) (Amsterdam: North-Holland, 1956) p. 1
20. Хохлов С С и др. *Краткие сообщ. по физике ФИАН* **41** (10) 31 (2014); Khokhlov S S et al. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **41** 292 (2014)
21. Хомяков В А и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **79** 405 (2015); Khomyakov V A et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **79** 371 (2015)
22. Bogdanov A G et al. *Astropart. Phys.* **36** 224 (2012)
23. Berghaus P, Xu C "Atmospheric muon spectrum from catastrophic energy losses in IceCube", in *32nd Intern. Cosmic Ray Conf., August 11–18, 2011, Beijing, China*
24. Petrukhin A A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **742** 228 (2014)
25. Барбашина Н С и др. *Приборы и техника эксперимента* (6) 20 (2000); Barbashina N S et al. *Instrum. Exp. Tech.* **43** 743 (2000)

26. Heck D et al., Report FZKA 6019 (Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998)
27. Богданов А Г и др. *ЯФ* **73** 1904 (2010); Bogdanov A G et al. *Phys. Atom. Nucl.* **73** 1852 (2010)
28. Avati V et al. *Astropart. Phys.* **19** 513 (2003)
29. Abdallah J et al. (Delphi Collab.) *Astropart. Phys.* **28** 273 (2007)
30. Wilkens H, L3 Collab., in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., July 31 – August 7, 2003, Trukuba, Japan* Vol. 3 (Eds T Kajita et al.) (Tokyo: Universal Acad. Press, 2003) p. 1131
31. Rodriguez G (for the Pierre Auger Collab.) *EPJ Web Conf.* **53** 07003 (2013)
32. Petrukhin A A, in *Vulcano Workshop Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics 2004* (Eds F Giovannelli, G Mannocchi) (Bologna, 2005) p. 489
33. Petrukhin A A *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **151** 61 (2006)
34. Petrukhin A, in *Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics, Vulcano Workshop 2006, 22–27 May 2006, Vulcano, Italy* (Eds F Giovannelli, G Mannocchi) (Bologna, 2007) p. 497
35. Petrukhin A A *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **175–176** 125 (2008)
36. Gao J-H et al. *Phys. Rev. C* **77** 044902 (2008)
37. Кокоулин Р П и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **79** 398 (2015); Kokoulin R P et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **79** 365 (2015)
38. Petrukhin A A *Acta Polytechnica* **53** (Suppl.) 707 (2013)
39. Zadeba E A et al. *JINST* **9** C08018 (2014)
40. Шульженко И А и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **77** 707 (2013); Shulzhenko I A et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **77** 641 (2013)
41. Aglietta M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **336** 310 (1993)
42. Apel W D et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **620** 202 (2010)
43. Gromushkin D M et al. *JINST* **9** C08028 (2014)

Cherenkov water detector NEVOD

A.A. Petrukhin

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),

Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation

E-mail: AAPetrukhin@mephi.ru

A world-unique multipurpose Cherenkov water detector, the NEVOD facility uses quasispherical measuring modules to explore all the basic components of cosmic rays at the Earth surface, including neutrinos. Currently, the experimental complex includes the Cherenkov water detector, the calibration telescope system and the coordinate detector. This paper traces the basic development stages of NEVOD, examines research directions, presents the results obtained, including the search of the solution of the "muon puzzle", and discusses possible future directions.

Keywords: Cherenkov radiation, Cherenkov detectors, photomultipliers, cosmic rays, muons, cascade showers, extensive air showers

PACS numbers: 29.40.Ka, 95.55.Vj, 96.50.S–

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505i.0521

Bibliography — 43 references

Received 23 March 2015

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 521 – 530 (2015)

Physics – Uspekhi **58** (5) (2015)