

**На правах рукописи**

**КИНДИН Виктор Владимирович**

**ЧЕРЕНКОВСКИЙ ВОДНЫЙ КАЛОРИМЕТР НА БАЗЕ  
КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

**01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Автор:**



**Москва - 2015**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

**Научный руководитель:** Петрухин Анатолий Афанасьевич,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, НИЯУ МИФИ, г. Москва

**Официальные оппоненты:** Кузьмичев Леонид Александрович, доктор  
физико-математических наук, заведующий  
лабораторией НИИЯФ МГУ им. М.В.  
Ломоносова

Безруков Леонид Борисович, доктор физико-  
математических наук, заведующий  
лабораторией ИЯИ РАН

**Ведущая организация:** Объединенный институт ядерных  
исследований, г. Дубна

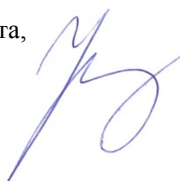
Защита состоится 23 декабря 2015 г. в 15 час. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409,  
Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и  
на сайте <http://ods.mephi.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух  
экземплярах, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор

 С.Е. Улин

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность**

Основным преимуществом черенковских водных детекторов (ЧВД) является большой угол черенковского излучения в воде ( $\sim 40^\circ$ ) и большая длина поглощения (десяtkи метров), что позволяет размещать детектирующие элементы (фотоумножители) на значительных расстояниях друг от друга и регистрировать заряженные частицы по черенковскому излучению в больших объемах воды, которая является мишенью для взаимодействия излучающих частиц. Естественно, наибольший интерес к таким детекторам был проявлен со стороны исследователей космических лучей, в том числе гамма – квантов и нейтрино, поток которых сильно уменьшается с ростом энергии. Поэтому для их регистрации требуются детекторы очень больших объемов. Черенковские водные детекторы также представляют интерес и для исследований других редких процессов, так как позволяют получить необходимую статистику за приемлемое время.

По своей структуре ЧВД делятся на периферические (фотоумножители расположены на стенах водного объема) и решетчатые (ФЭУ komponуются в оптические модули, из которых формируется пространственная решетка). Только решетчатая структура позволяет создавать ЧВД практически любого объема. Однако в созданных крупномасштабных детекторах (Байкал, ANTARES, IceCube) расстояния между модулями составляют десятки метров, в то время как радиационная единица длины в воде составляет  $\sim 36$  см и, соответственно, продольный размер электромагнитных и ядерных каскадов не превышает 10 м. Поэтому для этих детекторов оценки энергии каскадных ливней можно проводить только в точечном приближении. Поэтому создание полноценного черенковского водного калориметра решетчатого типа является актуальной задачей.

Черенковский водный детектор НЕВОД с самого начала задумывался как калориметр, способный детально исследовать каскадные ливни в воде по черенковскому излучению. К сожалению, время его создания пришлось на начало 90-х годов прошлого столетия и по понятным причинам полностью проект, в том числе калориметрический режим работы, не мог быть реализован.

### **Цель работы**

Разработка концепции и новых систем, обеспечивающих преобразование черенковского водного детектора НЕВОД на базе квазисферических модулей в черенковский водный калориметр (ЧВК) для измерения энерговыделений от единиц ГэВ до десятков ТэВ.

## **Научная новизна**

1. Создан первый в мире черенковский водный калориметр с 4 $\pi$ -геометрией на базе квазисферических модулей (КСМ) на поверхности Земли.
2. Впервые обеспечено измерение полной каскадной кривой и энерговыделения групп мюонов в черенковском водном детекторе решетчатого типа в широком диапазоне энергий до десятков ТэВ.

## **Достоверность**

Основана на том, что блоки новых систем детектирования и регистрации были протестированы на специализированных стендах для калибровки фотоумножителей, измерения характеристик КСМ, узлов внутримодульной электроники и блоков электроники кластера, которые настраивались и тестировались с использованием сертифицированного измерительного оборудования. Точность восстановления треков мюонов была проверена путем сопоставления с данными других установок (СКТ и ДЕКОР), имеющих более высокую угловую точность. Оценка энергетических характеристик регистрируемых событий основана на мюонной калибровке и линейности измерительных каналов.

## **Практическая значимость**

Создание черенковского водного калориметра открыло возможности проведения широкого спектра научных исследований, связанных с измерением энергетических характеристик регистрируемых событий, в том числе направленных на решение "мюонной загадки".

Разработанная кластерная организация ЧВК позволяет проводить расширение детектирующей пространственной решетки путем простого добавления новых кластеров.

Квазисферические измерительные модули начали использоваться и в других черенковских водных детекторах, например, в установке ANTARES.

## **Личный вклад**

Автор участвовал в развертывании, запуске и эксплуатации первого в мире черенковского водного детектора на базе квазисферических модулей. Внес определяющий вклад в разработку концепции преобразования черенковского водного детектора в черенковский калориметр, в разработку детектирующей, регистрирующей и других систем; принимал непосредственное участие в создании стендов и методик для тестирования всех узлов и блоков новой регистрирующей системы, непосредственно участвовал в развертывании, запуске и настройке систем ЧВК. Обеспечивал проведение длительных

экспериментальных серий для получения методических и физических результатов, а также занимался обработкой и анализом экспериментальных данных.

### **Автор защищает**

1. Концепцию преобразования ЧВД НЕВОД в первый в мире ЧВК на базе квазисферических модулей.
2. Новые системы (детектирующую, регистрирующую, триггерную и другие), обеспечивающие калориметрический режим работы ЧВД НЕВОД в широком динамическом диапазоне от 1 до  $10^5$  фотоэлектронов.
3. Кластерную организацию черенковского водного калориметра.
4. Зависимость калибровочных характеристик от прозрачности воды.
5. Использование ЧВК для исследования каскадных ливней от одиночных мюонов и энергосыделения групп мюонов.

### **Апробация**

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: БМШ ЭТФ 2006, Научных сессиях НИЯУ МИФИ (2009, 2014, 2015), Всероссийских конференциях по космическим лучам (2010, 2012, 2014), Европейских симпозиумах по космическим лучам (ECRS 2010, 2012, 2014), Международных конференциях по космическим лучам (ICRC 2009, 2011, 2015). По материалам диссертации опубликовано 15 работ, из них в научных изданиях, входящих в перечни Web of Science или Scopus, – 9.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 116 стр., 87 рис., 4 табл., 66 наименований цитируемой литературы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** представлен обзор черенковских водных детекторов (ЧВД), созданных в последние десятилетия, которые широко используются для проведения исследований по различным направлениям физики частиц и космических лучей.

**В главе 1** приводится описание ЧВД НЕВОД, введенного в эксплуатацию в 1994 году и проработавшего в разных модификациях до 2007 года.

Основополагающим моментом при выборе наземного расположения черенковского детектора НЕВОД было требование обеспечить одновременную регистрацию нейтринных событий из нижней

полусферы и других частиц (мюонов, групп мюонов, стволов ШАЛ и др.) из верхней полусферы. Для этого нужно было разработать оптический модуль (ОМ), обладающий независимостью амплитудного отклика от направления прихода черенковского излучения. На момент разработки, отечественной промышленностью выпускался только один фотоумножитель с большим диаметром фотокатода – ФЭУ-49Б. Амплитудный отклик  $A_i$  фотоумножителя с плоским фотокатодом описывается следующей формулой:

$$A_i \approx \frac{\eta \cdot n \cdot S \cdot \cos \alpha_i}{2\pi \cdot R \cdot \sin \theta_c} \cdot \exp\left(-\frac{R}{l \cdot \sin \theta_c}\right), \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние между ФЭУ и треком частицы;  $S$  – площадь фотокатода;  $n$  – число фотонов, испущенных с единицы длины трека (в частотном диапазоне спектральной чувствительности фотокатода);  $\eta$  – эффективная квантовая чувствительность;  $\theta_c$  – угол черенковского излучения;  $\alpha_i$  – угол падения света на фотокатод;  $l$  – эффективная длина поглощения света в воде, усредненная по частотному спектру черенковского излучения в области чувствительности фотокатода. Зависимость отклика ФЭУ от угла падения черенковского излучения ( $\cos \alpha_i$ ) не позволяет определить расстояние до источника и направление на него с помощью одного ФЭУ. Однако, если использовать симметричную систему из шести фотоумножителей с плоскими фотокатодами, ориентированными вдоль ортогональных осей координат, то такая система будет обладать свойствами ФЭУ со сферическим фотокатодом, поскольку сумма квадратов амплитуд трех засвеченных фотоумножителей не зависит от направления излучения (рис. 1).

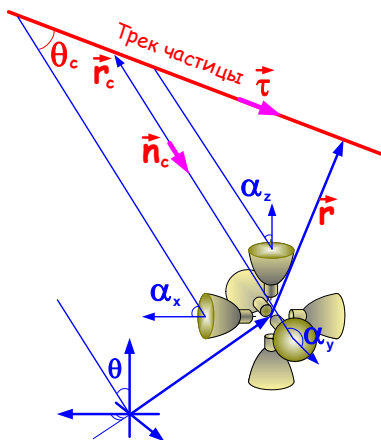


Рисунок 1. Квазисферическая система из шести фотоумножителей.

Действительно, так как  $\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1$ , то сумма квадратов откликов трех ФЭУ может быть выражена формулой:

$$\sum_{i=1}^3 A_i^2 = \frac{\eta^2 \cdot n^2 \cdot S^2}{4\pi^2 \cdot R^2 \cdot \sin^2 \theta_c} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot R}{l \cdot \sin \theta_c}\right) = B^2 \quad (2)$$

и зависит только от расстояния между модулем и треком частицы. Величина  $B = \sqrt{\sum A_i^2}$  является откликом модуля и дает возможность определить расстояние  $R$  до трека частицы. В то же время, зная отклик модуля и значения амплитуд сигналов на каждом ФЭУ, можно оценить и направление прихода черенковского излучения, поскольку  $A_i/B = \cos \alpha_i$ . Эти косинусы определяют направление падающего излучения. Таким образом, даже один квазисферический модуль указывает на "точку" излучения на треке частицы. При наличии хотя бы двух сработавших модулей можно восстановить, в первом приближении, положение трека частицы. Для более надежного восстановления треков заряженных частиц используется плотная пространственная решетка. Расстояние между модулями - 2.5 м вдоль детектора, 2.0 м поперек и по глубине. Такая решетка образует регистрирующую систему со свойствами 4π-детектора (рис. 2).

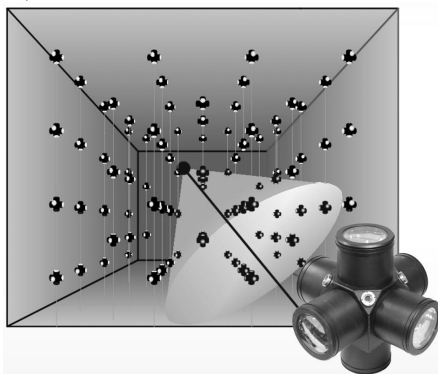


Рисунок 2. Детектирующая пространственная решетка.

Измерительная система ЧВД НЕВОД 1994 – 2007 гг. функционально была разделена на обычные подсистемы: детектирующую, регистрирующую, триггерную, управления, мониторинга и считывания, а конструктивно на два главных уровня: внутримодульная электроника, которая располагалась непосредственно внутри КСМ, и внешние системы, которые располагались в помещениях.

Разделение регистрирующей и триггерной систем было реализовано на уровне электроники КСМ, которая состояла из шести идентичных блоков электроники ФЭУ (БЭФ), центрального внутримодульного блока (ЦВБ) и импульсного источника света системы мониторинга.

Центральный внутримодульный блок вырабатывал логический сигнал "с" (coincidence) в случае совпадения сигналов от двух соседних ФЭУ во временных воротах 80 нс. Это условие было введено, чтобы подавить большой уровень шумов ФЭУ-49Б. Этот сигнал использовался для управления работой спектрометрических каналов модуля и посылался во внешнюю систему формирования триггера (ВСФТ) одновременно с двумя другими сигналами, которые соответствуют срабатыванию вверх и вниз смотрящих ФЭУ.

Для калибровки фотоумножителей КСМ в течение длительных сеансов измерений была создана система калибровочных телескопов (СКТ). На крышке и на дне бассейна было размещено по 35 сцинтилляционных счетчиков, которые размещались между гирляндами КСМ и обеспечивали точность определения трека одиночного мюона  $\sim 2^\circ$  в диапазоне зенитных углов от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  (рис. 3).

Для расширения экспериментальных возможностей ЧВД НЕВОД в 1999 году вокруг бассейна был развернут координатно-трековый детектор ДЕКОР (рис. 3) из пластиковых трубок, работающих в режиме ограниченного стримера, который предназначен для изучения космических лучей в широком диапазоне зенитных углов, вплоть до горизонта. Детектор состоит из 8 вертикально подвешенных на несущей раме супермодулей (СМ) площадью  $3.1 \times 2.7 \text{ м}^2$ , пространственная точность восстановления трека мюона обеспечивается лучше 1 см, а угловая  $\sim 0.7^\circ$ .

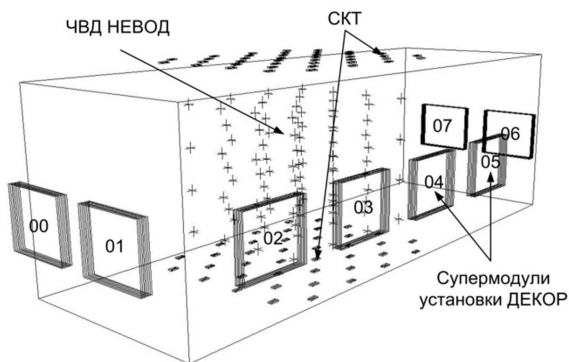


Рисунок 3. Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.



В такой конфигурации работоспособность ЧВД поддерживалась до мая 2007 г. Опыт, полученный в течение длительного периода эксплуатации детектора, позволил разработать концепцию преобразования ЧВД в черенковский водный калориметр (ЧВК), включающую решение следующих задач:

- разработку нового фотоумножителя, обладающего более низким (на порядок) темпом счета темновых импульсов и более высокой эффективностью регистрации, что позволяет отказаться от условия двойных совпадений, которые несовместимы с калориметрическим режимом работы ЧВД;
- разработку спектрометрического канала с широким динамическим диапазоном измеряемых сигналов от 1 до  $10^5$  ф.э., который позволяет измерять каскадные кривые ливней и энерговыделение групп мюонов в воде с энергиями до десятков ТэВ;
- обеспечение полной взаимозаменяемости элементов измерительной системы ЧВД. Для этого в КСМ необходимо оставить только электронику, обеспечивающую регистрацию фотоумножителями световых вспышек, и систему мониторинга. Источник высоковольтного питания должен располагаться внутри КСМ, что позволяет отказаться от использования выделенного высоковольтного кабеля. Вся обрабатывающая электроника выносится из воды в отдельные блоки, устанавливаемые под светоизолирующей крышкой бассейна.

Система должна формироваться по кластерному принципу. Порядок расположения КСМ в кластере определяется только схемой подключения к блоку электроники (БЭК), а их адресация задается программным образом. Такая структура позволяет гибко изменять и расширять конфигурацию регистрирующей системы. Для анализа зарегистрированных событий необходимо использовать информацию даже от одиночного фотоумножителя в КСМ. Набор триггерных сигналов должен формироваться на уровне каждого кластера, а их анализ обеспечиваться на следующем уровне – в триггерной системе. Плотная детектирующая решетка из КСМ хорошо вписывается в задачу измерения каскадных ливней, однако для прозрачности воды с длиной ослабления черенковского света  $\sim 1.4$  м средний отклик сработавших ФЭУ в мюонных событиях составлял 1 ф.э. Необходимо очистить воду для обеспечения среднего отклика ФЭУ  $\geq 3$  ф.э. Для этого требуется новая система водоподготовки.

**Вторая глава** посвящена разработке новых систем (детектирующей, регистрирующей, триггерной и др.) для черенковского водного калориметра (ЧВК). Его структурная схема приведена на рис.4.

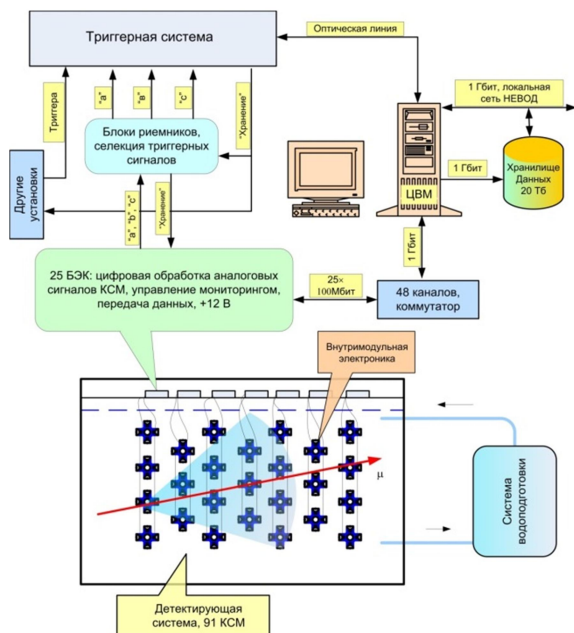


Рисунок 4. Структура ЧВК НЕВОД.

Основой детектирующей системы является фотоэлектронный умножитель ФЭУ-200, который был разработан на заводе “Экран” (г. Новосибирск) в рамках программы поддержки приборной базы науки Минпромнауки РФ специально для ЧВД НЕВОД. Фотоумножитель был внедрен в производство в 2003 г.

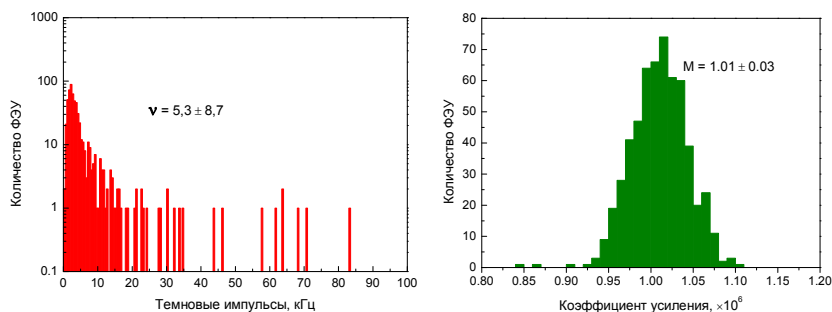
Фотоумножитель имеет фотокатод диаметром 150 мм, максимум спектральной характеристики в области 410 – 430 нм, электростатическую фокусировку электронов и 12-диодную умножительную систему. Средний темп счета шумовых импульсов составляет  $\sim 10$  кГц, что в 5 раз ниже, чем для ФЭУ-49Б. Другой важной характеристикой является чувствительность ФЭУ, которая для ФЭУ-200 составляет величину порядка 15 – 20% на длине волны 410 нм, что почти в 2 раза выше, чем у ФЭУ-49Б.

На стенде "КАЛИФ-80" (калибровка 80 фотоумножителей одновременно) были измерены следующие характеристики 584 ФЭУ:

- напряжение питания фотоумножителя, обеспечивающее коэффициент усиления диодной системы  $10^6$ ;
- одноэлектронные амплитудные и временные характеристики (джиттер);

- темп счета шумовых сигналов при приведенном к выходу ФЭУ порого 120 мкВ;
- амплитуда отклика на стандартную (многоэлектронную) подсветку от светодиода с длиной волны излучения 470 нм.
- наиболее вероятную относительную задержку отклика ФЭУ при одноэлектронной подсветке от светодиода (соответствующей 10% эффективности регистрации).

При паспортизации фотоумножителей напряжение питания положительной полярности HV устанавливается таким, чтобы коэффициент усиления  $M$  диодной системы был равен  $10^6$ . Это напряжение не является одинаковым для различных экземпляров фотоумножителей, разброс его значений определяется в первую очередь технологией изготовления диодной системы. Все остальные параметры определяются при выставленном значении коэффициента усиления и соответствующем ему напряжении питания. На рисунке 5 представлены распределения по темпу счета шумовых импульсов (слева) и полученным коэффициентам усиления (справа).



*Рисунок 5. Распределение по темпу счета шумовых импульсов ФЭУ (слева) и коэффициентам усиления (справа).*

Из рисунка 5 видно, что только 15 фотоумножителей ( $< 3\%$ ) имеют частоту шумов, превышающую максимальное значение, указанное в ТУ на изготовление ФЭУ-200 (30 кГц). Полученные результаты стендовых исследований показали перспективность использования ФЭУ-200 в черенковском водном калориметре.

Для корректного измерения энергии каскадных ливней и энерговыделения групп мюонов необходимо обеспечить широкий динамический диапазон сигналов, снимаемых с фотоумножителей КСМ ( $\sim 10^5$  ф.э.). Для этого используется съем сигналов с двух диодов, с 12-го и 9-го. Измерения диапазонов линейности диодов (рис. 6) показали, что для 12-го диода верхнее значение составляет  $\sim 400$  пКл,

это соответствует  $2.5 \times 10^3$  фотоэлектронов, при коэффициенте усиления диодной системы фотоумножителя  $M = 10^6$ . Для 9-го диода это значение составило 360 пКл. Если учесть, что коэффициент усиления между 9 и 12 диодами примерно составляет  $\sim 80$ , то можно измерять сигнал с 9-го диода, работающего в линейном режиме, соответствующий  $10^5$  ф.э.

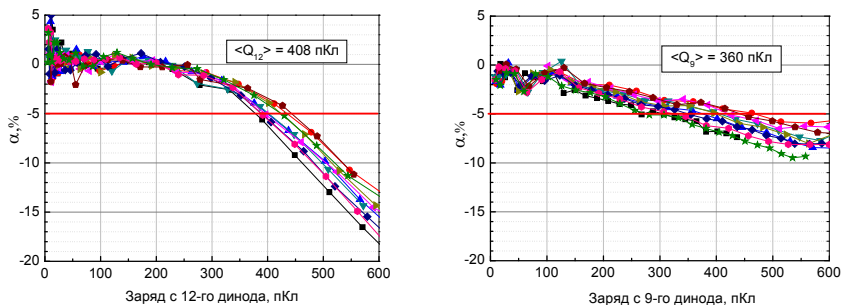


Рисунок 6. Зависимость коэффициента нелинейности  $\alpha$  от заряда с 12-го диода (слева) и для 9-го диода (справа).

Внутримодульная электроника (ВЭ) включает в себя шесть плат ПХ-514П, комбинированный узел питания ПНН-382, шестиканальную светодиодную систему мониторинга спектрометрических каналов, комплект перемычек и два глубоководных сигнальных кабеля (рис.7). На плате ПХ-514П размещен резистивный высоковольтный делитель питания ФЭУ и два зарядо-чувствительных усилителя (ЗЧУ). Выходная амплитуда  $U_{\text{вых}}$  такого усилителя пропорциональна заряду  $Q_{\text{вх}}$ , снимаемому с диода. Использование ЗЧУ позволяет преобразовать короткие сигналы с диода (50–100 нс по основанию) в длинные сигналы специальной формы и обеспечивает передачу этих сигналов без искажений в БЭК. Коэффициенты преобразования ЗЧУ 12-го и 9-го диодов составляют:  $k_{12} = 25$  мВ/пКл,  $k_9 = 12.5$  мВ/пКл.

Для контроля характеристик спектрометрического тракта ФЭУ→ЗЧУ→АЦП в ВЭ используется система мониторинга, состоящая из шестиканального контроллера и шести драйверов со светодиодами (длительность импульса на полувысоте амплитуды составляет  $\sim 8$  нс). Контроллер построен на микросхеме MAX521ACWG, содержащей восемь 8-разрядных ЦАП, и шести сумматоров напряжений. Управление контроллером осуществляется по шине I2C. Шестиканальная система мониторинга позволяет индивидуально для каждого ФЭУ подбирать необходимый код подсветки и контролировать характеристики спектрометрического тракта во всем диапазоне измеряемых сигналов.

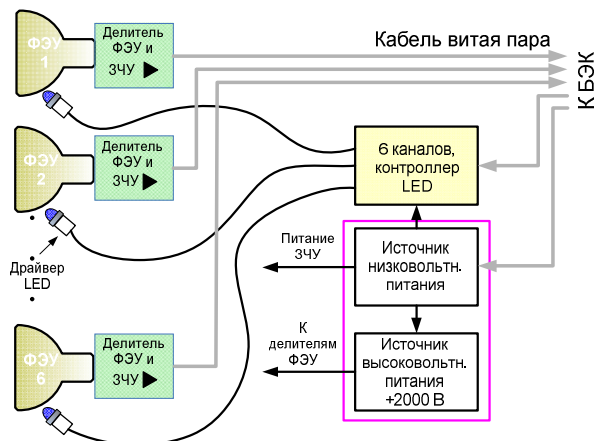


Рисунок 7. Блок-схема внутримодульной электроники.

Блоки электроники кластеров, всего в установке 25 кластеров, располагаются под светоизолирующей крышкой бассейна. Между крышкой и поверхностью воды 100% влажность, поэтому для обеспечения гидроизоляции электроника помещена в нержавеющий корпус с классом защиты IP66. К одному БЭК можно подключить до 4 КСМ. Каждый БЭК включает: четыре одинаковых модуля амплитудного анализа МАА-01П, процессорную плату WAFER-C400E2VN-RS, модуль сопряжения МС-01П с датчиком температуры, модуль питания МП-01П и набор коммутационных перемычек (рисунок 8).

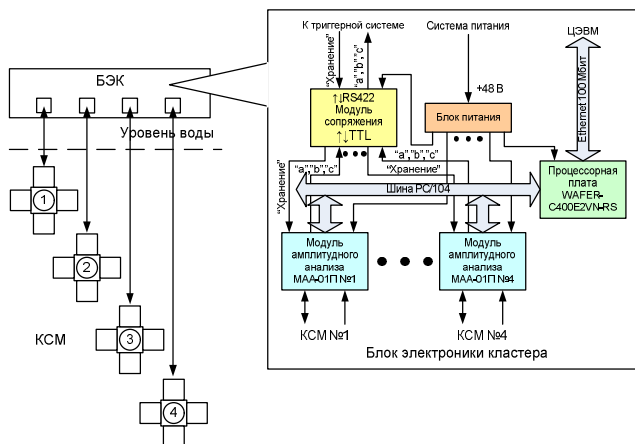


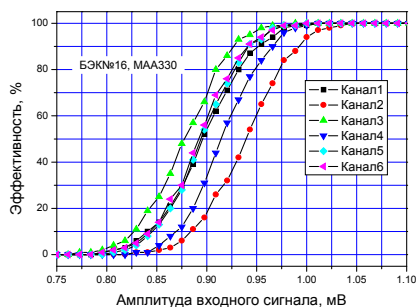
Рисунок 8. Блок-схема электроники кластера.

Модули амплитудного анализа являются основой БЭК, они производят параллельную оцифровку аналоговых сигналов 9-х и 12-х динодов ФЭУ с помощью 12-разрядных 2-канальных АЦП ADS7862YB. Наличие в АЦП устройств выборки-хранения (длительность строб-сигнала составляет 25 нс) позволяет точно фиксировать значение амплитуды пологой вершины сигналов с КСМ. Для запуска схемы преобразования и выработки логических сигналов платы МАА-01П содержат дискриминаторы с программно управляемым порогом, точность установки которого составляет 0.1 мВ/МЗР (или 0.004 пКл/ МЗР), порог устанавливается одинаковым для всех шести каналов. Максимальное значение порога составляет 1 пКл. Схема формирования триггерных сигналов реализована на ПЛИС Xilinx XC2S50-6PQ208C. Измерение темпа счета шумовых импульсов проводится с помощью шести 16-разрядных счетчиков. В ПЛИС реализована схема выработка триггерных сигналов трех типов для каждого КСМ: "а" (any) – логическое "ИЛИ" шести сигналов с 12-х динодов ФЭУ; "b" (bottom) – сигнал от ФЭУ, фотокатод которого направлен вниз; "с" (coincidence) – совпадение сигналов в пределах временного окна 150 нс от любых двух ФЭУ, кроме противоположно направленных. В БЭК реализовано два основных режима работы: мониторинга и экспозиции.

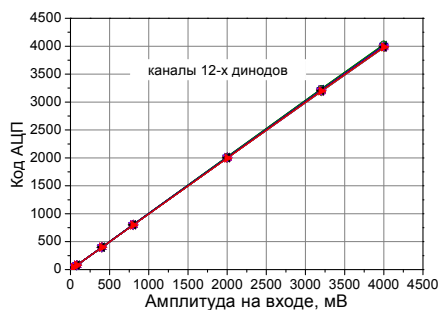
В режиме мониторинга дискриминаторы платы МАА блокируются. Процесс измерения сигналов с ФЭУ синхронизирован с сигналом запуска светодиодов внутренней подсветки. Через 250 нс после генерации сигнала запуска светодиодов запускается устройство выборки хранения (УВХ), время выборки которого 25 нс попадает на пологую вершину сигнала с ЗЧУ. По окончании процесса выборки следует преобразование АЦП с последующим чтением данных из буферов ПЛИС и их передачей процессорной платой на ЦЭВМ детектора.

В режиме экспозиции при превышении сигналом с ФЭУ порога дискриминатора вырабатывается логический сигнал (ЛС), который передается в схему формирования триггеров, реализованную в ПЛИС. Через 100 нс после формирования ЛС осуществляется выборка-хранение и АЦП запускается на преобразование. Во время преобразования спектрометрический канал ФЭУ блокирован. Также после ЛС дискриминатора через программно задаваемый промежуток времени  $T_D$  открываются ворота ожидания сигнала «Хранение» от триггерной системы верхнего уровня детектора. Если сигнал «Хранение» получен и его активный фронт попадает во временные ворота 250 нс, проводится фиксация данных в регистрах АЦП. Чтение данных из регистров осуществляется по команде от ЦВМ. В противном случае данные сбрасываются, а АЦП переводится в режим регистрации событий по черенковскому излучению.

Перед сборкой кластера все его элементы: квазисферические модули и БЭК тестируются на автоматизированных стендах. Если параметры характеристик измерительных каналов выходят за рамки требуемых критериев, то производится их настройка и затем повторное тестирование. Для этих целей был разработан автоматизированный стенд и соответствующая методика. Стенд обеспечивает проверку всех основных режимов работы и калибровку логических и спектрометрических каналов БЭК. На рисунках 9 и 10 представлены калибровочные зависимости шести логических каналов и 72 спектрометрических каналов.



*Рисунок 9. Зависимость эффективности регистрации логическими каналами входного сигнала для одного модуля.*

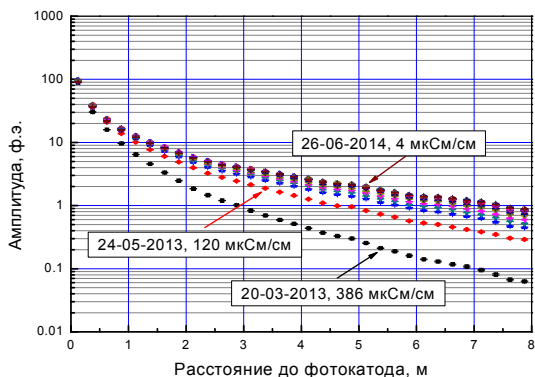


*Рисунок 10. Средняя калибровочная зависимость для 72 спектрометрических каналов.*

Каждый блок электроники кластера хранит данные в регистрах платы МАА-01П. Чтение и запись необходимых данных осуществляются по шине PC-104 (промышленный стандарт ISA). Для организации локальной сети сбора данных используется протокол Ethernet со скоростью передачи 100 Мбит/с, а для управления потоком данных – Ethernet коммутатор AT-8000S, имеющий 48 портов 100Base - TX и 2 порта 1000Base - T (Gigabit Ethernet). Среднее время опроса всей системы в условиях реального эксперимента не превышает 2.9 мс.

Для выделения определенных классов событий была разработана многоуровневая триггерная система, нижний уровень которой находится в БЭК. Триггерная система построена из четырех программируемых блоков V1495 CAEN на базе шины VME. Три блока используются для анализа триггерных сигналов с кластеров ЧВК НЕВОД, четвертый блок предназначен для анализа триггерных сигналов с других детекторов. Все триггерные сигналы от БЭК в режиме реального времени передаются в четыре блока приемников, которые выполняют их селекцию по трем типам ("a", "b", "c") и передают на соответствующие блоки V1495. Сформированные сигналы поступают в сумматор, а полученная сумма – в компаратор, уровень срабатывания которого соответствует порогу мажоритарной схемы совпадений. При превышении этого порога вырабатывается общесистемный сигнал “Хранение”. Этот сигнал возвращается на остальные триггерные блоки и затем транслируется на все установки для фиксации зарегистрированных данных. Кроме выработки триггерных сигналов, триггерная система обеспечивает передачу сигнала управления системы мониторинга.

Прозрачность воды и другие ее параметры сильно влияют на эффективность регистрации черенковского излучения. В конце апреля 2013 года была запущена новая система водоподготовки, предназначенная для очистки воды до состояния, близкого к дистилляту. В результате оптические свойства воды значительно улучшились и увеличился амплитудный отклик ФЭУ. На рис. 11 представлены зависимости усредненного отклика на одиночный мюон по всем сработавшим фотомножителям для электропроводности воды от 386 до 4 мкСм/см.



*Рисунок 11. Зависимость усредненного отклика сработавших фотомножителей на одиночный мюон от расстояния до трека для разной электропроводности воды.*



В третьей главе приводятся экспериментальные результаты по выделению одиночных мюонов. Дается оценка точности определения направления на черенковское излучение одним КСМ. Описываются калориметрические возможности детектора НЕВОД, приводятся результаты измерения энергии каскадных ливней и энергосодержания групп мюонов.

Черенковский водный детектор, созданный на базе квазисферических измерительных модулей, является 4 $\pi$ -калориметром, позволяющим практически с одинаковой эффективностью измерять распределение энергосодержания в каскадных ливнях с любого направления. Важной характеристикой ЧВД является отклик фотоумножителей КСМ на одиночные мюоны, который служит нормировочной точкой для количественных оценок энергосодержания каскадных ливней и групп мюонов. Измерение этого отклика проводилось с помощью установки ДЕКОР (ее части Short&Short). Супермодули конфигурации Short&Short: CM00 и CM01 находятся в одной короткой галерее с внешней стороны водного бассейна, а CM06 и CM07 – в противоположной галерее. Триггерным условием являлось совпадение сигналов двух СМ в пределах временных ворот 250 нс (триггер Tr3 ДЕКОР). При этом анализировались события типа OneTrack, в которых срабатывает только по одному супермодулю в каждой из коротких галерей, причем оба трека, восстановленные по данным супермодулей, должны совпадать в конусе с раствором не более 5°. В этом случае отрезки треков в отдельных СМ считаются треком одной частицы. Одним из параметров отклика ЧВД на событие является количество сработавших ФЭУ в квазисферических модулях. На рисунке 12 приведены распределения всех событий, зарегистрированных по триггеру Tr3, и событий типа OneTrack по количеству сработавших в ЧВД фотоумножителей.

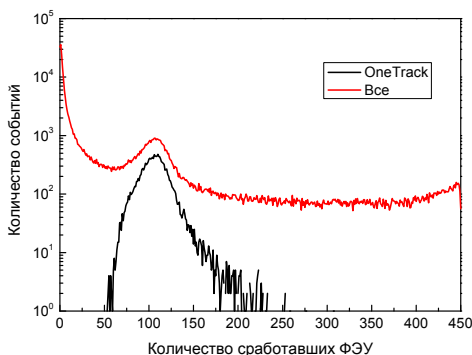
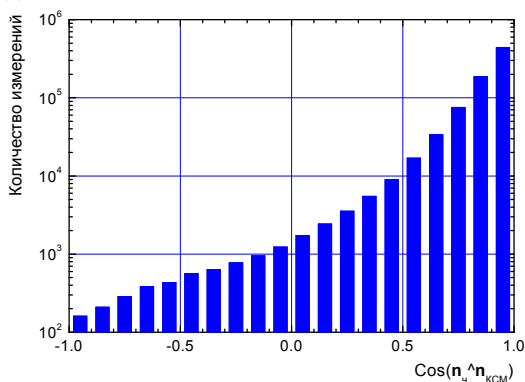


Рисунок 12. Распределения всех событий, зарегистрированных по триггеру Tr3, и событий OneTrack по количеству сработавших ФЭУ в ЧВД.

На распределении всех событий, зарегистрированных по триггеру Tr3, хорошо выделяется мюонный пик, который совпадает с пиком событий типа OneTrack (параметры распределения  $\langle N_{\text{PMT}} \rangle = 107.6$ ,  $\sigma = 20.4$ ).

Для оценки способности отдельного КСМ определять направление прихода черенковского света отбирались события, в которых прохождение одиночной частицы выделялось системой калибровочных телескопов. В качестве оценки данного направления используется взятый с обратным знаком вектор, получаемый путем суммирования векторов по трем сработавшим ФЭУ, где каждому ФЭУ ставится в соответствие вектор с направлением по внешней нормали к плоскости фотокатода, пропорциональный величине амплитудного отклика. Диапазон отбираемых расстояний от трека частицы до центра оптического модуля составляет от 0.5 до 2 м. Для каждого сработавшего КСМ определялся косинус угла между указанной оценкой и направлением прихода черенковского излучения от трека мюона, определяемого по данным СКТ. Распределение данной величины представлено на рисунке 13, из которого получено, что средняя погрешность определения направления на свет одним КСМ составляет около  $27^\circ$ .



*Рисунок 13.  
Распределение  
косинуса угла между  
направлением  
черенковского света  
по данным СКТ и  
оценкой, получаемой  
по откликам КСМ.*

Калориметрические свойства черенковского водного детектора НЕВОД в основном определяются его детектирующей системой и широким динамическим диапазоном регистрируемых сигналов от 1 до  $10^5$  ф.э. В отличие от обычных слоистых калориметров, в которых количество измеряемых точек на каскадной кривой определяется числом детектирующих плоскостей, в ЧВК этот параметр зависит от соотношения расстояния между измерительными модулями и длиной ослабления черенковского излучения и может в несколько раз превышать число детектирующих плоскостей.

Исследование каскадных ливней проводилось при двух условиях отбора. В первом случае с помощью координатно-трекового детектора ДЕКОР достаточно точно определялся трек мюона, совпадающий с осью каскадного ливня. Во втором случае события с каскадными ливнями отбирались по суммарному энерговыделению в ЧВД.

В первом случае задача сводилась к определению двух параметров теоретической каскадной кривой: энергии каскада  $E_0$  и его положения на соответствующем треке мюона. В качестве положения может быть выбрано начало рождения каскада, его максимум или центр тяжести. При использовании в качестве параметра точки рождения каскада  $t_0$ , каскадная кривая аппроксимируется приближенным аналитическим выражением:

$$N^{\text{теор}}(y_0, t_0, t) = \left( \frac{0.32}{\sqrt{y_0}} \right) \cdot \exp((t - t_0) \cdot (1 - 1.5 \ln s)) \quad (3)$$

где  $y_0 = \ln(E_0 / \varepsilon)$ ,  $s = 3(t - t_0)/(t - t_0 + 2y_0)$  - возраст ливня;  $E_0$  - энергия ливня,  $t_0$  - координата точки генерации ливня. Для получения каскадных кривых были использованы ливни, генерируемые околоразрешенными мюонами космических лучей, прошедшими вдоль бассейна ЧВК. За 7945 часов живого времени было зарегистрировано около 120 тыс. ливней с восстановленной энергией выше 1 ГэВ. Участок оси ливня, лежащий внутри бассейна, разделяется на отрезки (бины), и вычисляется количество заряженных частиц, приходящихся на каждый бин, который «виден» фотоумножителями детектора, длина бина - одна радиационная единица. За точку начала отсчета бинов на оси ливня принимается точка пересечения оси с перпендикулярной ей плоскостью, проходящей через центр решетки детектора. Пример восстановленного каскада с энергией около 740 ГэВ представлен на рисунке 14.

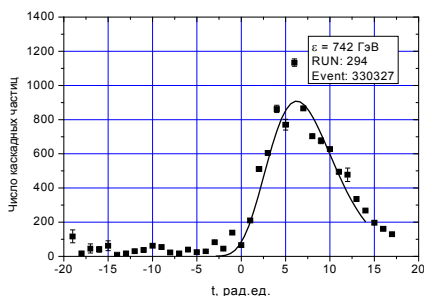


Рисунок 14. Пример восстановленной каскадной кривой.

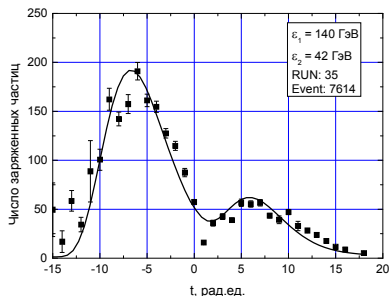


Рисунок 15. Пример восстановленной каскадной кривой с двумя ливнями.

При регистрации одиночных мюонов,двигающихся вдоль бассейна, может образовываться несколько каскадов, при этом их каскадные кривые складываются. Если точки генерации этих каскадов разнесены на достаточно большое расстояние, более 10 радиационных единиц, то в зависимости числа заряженных частиц наблюдаются дополнительные максимумы (рис. 15).

Во втором случае, когда положение оси каскада неизвестно, задача усложняется. Большие энерговыделения в ЧВК могут вызываться не только каскадами от одиночных мюонов, но и каскадами от адронной и электронно-фотонной компонент космических лучей, а также широкими атмосферными ливнями. Другая сложность при восстановлении каскадной кривой таких событий связана с появлением еще четырех неизвестных параметров: две дополнительные координаты и два угла. В то же время количество таких каскадов примерно на два порядка больше, чем каскадов с известной осью.

Особенности установки ДЕКОР, расположенной вокруг ЧВК НЕВОД, а именно вертикальное расположение восьми супермодулей и хорошее координатное разрешение, позволяют эффективно регистрировать группы мюонов под большими зенитными углами. Регистрация таких событий позволяет получать информацию о характеристиках потока и взаимодействиях первичных частиц в интервале энергий  $10^{15} - 10^{19}$  эВ. Совместный эксперимент на установках НЕВОД и ДЕКОР по измерению энерговыделения групп мюонов был начат в мае 2012. Суммарная продолжительность “живого” времени наблюдений на февраль 2014 года составила 9673 ч. Отбирались группы с кратностью мюонов  $m \geq 5$  и зенитными углами прихода  $\theta \geq 55^\circ$  (16416 событий). Дополнительно из части экспериментального материала (за 3253 ч измерений) отобраны группы при меньших зенитных углах ( $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$ , 15084 события). В качестве меры энерговыделения используется сумма  $\Sigma$  сигналов всех сработавших ФЭУ (выражаемая в единицах фотоэлектронов, ф. э.). Очевидно, что для наклонных ШАЛ размеры установки малы, и регистрироваться будет только часть мюонов. Но при этом плотность мюонов в пределах установки можно считать постоянной, а треки частиц будут параллельны. Плотность мюонов  $D$  в событии (с учетом смещения оценки из-за падающего спектра плотности и пуассоновских флуктуаций числа частиц, попавших в детектор) оценивается по данным ДЕКОР как:

$$D = (m - \beta) / S_{\text{дет}} \quad (4)$$

где  $S_{\text{дет}}$  – суммарная площадь супермодулей координатного детектора для данного направления прихода группы,  $\beta = 2.1$  – показатель наклона интегрального спектра локальной плотности в рассматриваемой области.

Предварительный анализ данных показал, что в первом приближении суммарное энерговыделение групп в детекторе пропорционально локальной плотности мюонов (рисунок 16), поэтому в дальнейшем рассматривается среднее удельное энерговыделение, нормированное на плотность мюонов в событиях  $\Sigma/D$ .

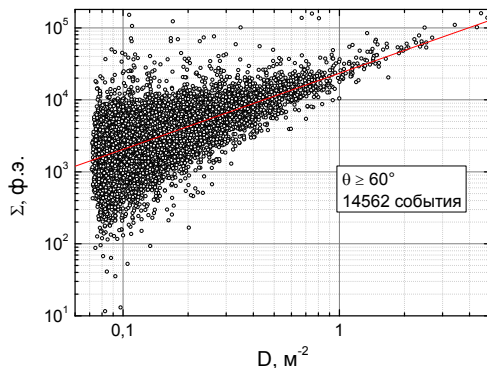


Рисунок 16. Зависимость суммарного энерговыделения от локальной плотности мюонов (выборка для зенитных углов  $\theta \geq 60^\circ$ ).

События с аномально малым энерговыделением обусловлены прохождением групп мюонов через супермодули ДЕКОР, расположенные вдоль коротких сторон бассейна, при этом происходит лишь частичная засветка ФЭУ. Результаты измерения зенитно-угловой зависимости среднего удельного энерговыделения представлены точками на рис. 17.

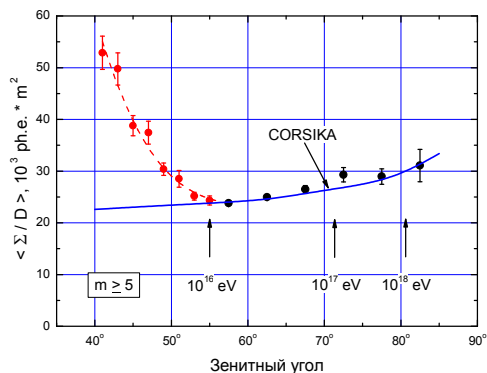


Рисунок 17. Зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла прихода группы. Точки – экспериментальные данные; сплошная кривая – ожидаемая зависимость для групп мюонов в ШАЛ; штриховая кривая – результат фитирования функцией (5).

Стрелками на рисунке указаны характерные энергии первичных частиц, дающих вклад в формирование мюонных групп при разных углах (расчетные среднелогарифмические значения). При малых зенитных углах ( $\theta < 55^\circ$ , светлые точки на рисунке) наблюдается быстрый спад измеренного энерговыведения с ростом угла, что объясняется уменьшающимся с толщиной атмосферы остаточным вкладом электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ в отклик незранированного детектора, расположенного на поверхности Земли. На этом участке зависимость хорошо аппроксимируется отрицательной экспонентой от толщины атмосферы (штриховая кривая):

$$\langle \Sigma/D \rangle \sim \exp(-X_0 \sec \theta / \Lambda) + \text{const}, \quad (5)$$

где  $X_0 = 1014 \text{ г см}^{-2}$  – средняя за период измерений толщина атмосферы в точке наблюдений в вертикальном направлении (соответствующая атмосферному давлению 746 мм рт. ст.),  $\Lambda = 134 \pm 15 \text{ г см}^{-2}$  – длина ослабления, близкая к известному пробегу поглощения нуклонной компоненты в атмосфере. При регистрации групп с зенитными углами более  $55^\circ$ – $60^\circ$  остается практически чистая мюонная компонента. В этой области наблюдается возрастание удельного энерговыведения с ростом зенитного угла (темные точки на рисунке).

**В заключении диссертации** сформулированы основные результаты работы:

- ✓ Разработана концепция преобразования черенковского водного детектора НЕВОД в первый в мире черенковский водный калориметр на базе квазисферических модулей.
- ✓ Разработаны регистрирующая, детектирующая, триггерная и другие системы, обеспечивающие калориметрический режим работы в широком динамическом диапазоне от 1 до  $10^5$  фотоэлектронов при измерении сигналов с ФЭУ.
- ✓ Разработаны и созданы стенды для тестирования и калибровки новых элементов регистрирующей системы ЧВК (внутримодульной электроники и блоков электроники кластера).
- ✓ Организована технологическая линия, протестированы все новые системы черенковского водного калориметра и измерены их характеристики.
- ✓ Получены зависимости амплитудного отклика фотоумножителей от расстояния до трека одиночной частицы для разной прозрачности воды и различных порогов регистрации.
- ✓ Создан и запущен первый в мире черенковский водный калориметр квазисферического типа с 4 $\pi$ -геометрией на поверхности Земли.

Обеспечена устойчивая работа ЧВК НЕВОД в течение длительных измерительных серий (2011-2015 гг.).

✓ Впервые проведены измерения каскадных кривых в черенковском водном детекторе решетчатого типа в рекордном диапазоне энергий от нескольких ГэВ до десятков ТэВ.

✓ Впервые проведены измерения энерговыделения групп мюонов в широком диапазоне зенитных углов, вплоть до горизонта.

Созданная кластерная организация ЧВК и его измерительные системы обеспечивают его расширение путем простого добавления новых кластеров во все системы ЧВК.

### **Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. V.V. Kindin, M.B. Amelchakov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, V.D. Burtsev, D.V. Chernov, S.S. Khokhlov, V.A. Khomyakov, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, E.A. Kovylyayeva, V. S. Kruglikova, V.V. Ovchinnikov, A.A. Petrukhin, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin, E.A. Zadeba. Measuring module of the Cherenkov water detector NEVOD (2015) Journal of Physics: Conference Series 632, art. no. 012015.
2. Р.П. Кокоулин, А.Г. Богданов, Л.И. Душкин, В.В. Киндин, Е.А. Ковыляева, Дж. Маннокки, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкери, В.А. Хомяков, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Исследование энергетических характеристик групп мюонов в наклонных ШАЛ. Известия РАН. Серия физическая. Т. 79. № 3. 2015. С. 398-400.
3. В.В. Киндин, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, В.Д. Бурцев, Е.А. Задеба, Е.А. Ковыляева, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, В.С. Кругликова, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, В.А. Хомяков, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. Исследование зависимости отклика черенковского водного детектора НЕВОД от прозрачности воды. Известия РАН. Серия физическая, 2015, том 79, № 3, с. 458-460.
4. S.S. Khokhlov, M.B. Amelchakov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, V.D. Burtsev, A.N. Dmitrieva, L.I. Dushkin, V.V. Kindin, E.A. Kovylyayeva, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, V.S. Kruglikova, V.V. Ovchinnikov, A.A. Petrukhin, V.A. Khomyakov, D.V. Chernov, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin, E.A. Zadeba. Study of cascade showers generated by near-horizontal muons in the water Cherenkov detector with a dense array of optical modules. 2014. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 41 (10), pp. 292-296.
5. S.S. Khokhlov, A.V. Borshevsky, D.V. Chernov, A.N. Dmitrieva, L.I. Dushkin, V.V. Kindin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin, E.A. Zadeba. Measurements of the energy spectrum of cascade showers initiated by muons in the Cherenkov water calorimeter NEVOD. 2013. Journal of Physics: Conference Series, 409 (1), art. no. 012134.

6. S.S. Khokhlov, M.B. Amelchakov, V.V. Ashikhmin, V.G. Gulyi, I.S. Kartsev, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, M.A. Korolev, A.A. Petrukhin, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.A. Vorobiev, I.I. Yashin, E.A. Zadeba. New measuring system of multipurpose Cherenkov water detector NEVOD. 2011. Astrophysics and Space Sciences Transactions, 7 (3), pp. 271-273.
7. S.S. Khokhlov, M.B. Amelchakov, V.V. Ashikhmin, I.A. Vorobiev, E.A. Zadeba, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, M.S. Sokolov, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. Muon calibration of the Cherenkov water detector NEVOD. 2011. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 75 (3), pp. 431-433.
8. S.S. Khokhlov; I.A. Vorob'ev; V.G. Gulyi, I. S. Kartsev, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, M.A. Korolev, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. New detecting system of the NEVOD Cherenkov water detector. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2010, Vol. 37, No. 4, pp. 126–128.
9. S.Yu. Matveev, V.G. Gulyi, I.S. Kartsev, S.S. Khokhlov, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, M.A. Korolev, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. The new measuring system of Cherenkov water detector NEVOD. Proc. 31st ICRC. 2009. Code 104675.

Подписано в печать .10.2015. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

---

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31