

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.123

Рег. № АААА-А16-116022510109-4

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН,  
чл.-корр. РАН

Л.В. Кравчук

«31» января 2019 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А16-116022510109-4

НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА, НЕЙТРИННАЯ, ГАММА И  
ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ, ФИЗИКА  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ФИЗИКА И ТЕХНИКА НЕЙТРИННЫХ  
ТЕЛЕСКОПОВ В НИЗКОФОНОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ  
ЛАБОРАТОРИЯХ

(промежуточный за 2018 год)

Руководитель НИР,  
Заместитель директора ИЯИ РАН,  
д.ф-м.н. профессор РАН

Г.И. Рубцов

«31» января 2019 г.

Москва 2019 г.



## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ


Руководитель НИР, заместитель  
директора ИЯИ РАН, д.ф.-м.н.,  
профессор РАН

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	Г.И. Рубцов (введение, заключение, раздел 5)
---	------------	--

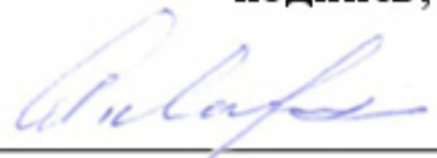
Исполнители:  
Зав. отделом, д.ф.-м.н., чл.-  
корр. РАН

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	О.Г. Ряжская (раздел 4)
---	------------	----------------------------


Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.  
РАН

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	Г.В. Домогацкий (раздел 1)
---	------------	-------------------------------

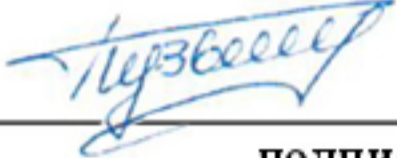
Зав. лаб., к.ф.-м.н.

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	А.С. Лидванский (раздел 7, 9)
--	------------	----------------------------------

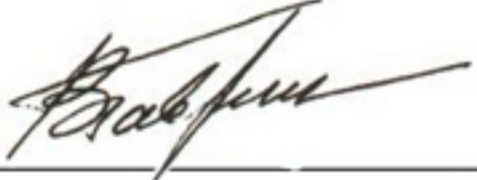
Зав. лаб., д.ф.-м.н.

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	Л.Б. Безруков (раздел 3)
---	------------	-----------------------------


Зав. филиалом, д.ф.-м.н.

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	В.В. Кузьминов (раздел 8)
---	------------	------------------------------

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.  
РАН

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	В.Н. Гаврин (раздел 2)
---	------------	---------------------------

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

 <hr style="width: 80%; margin: 0 auto;"/> подпись, дата	31.01.2019	Р.А. Мухамедшин (раздел 6)
---	------------	-------------------------------

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 80 с., 29 рис., 1 табл.

Ключевые слова: НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ШИРОКИЙ АТМОСФЕРНЫЙ ЛИВЕНЬ, ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ, ГАММА-ВСПЛЕСК, АДРОНЫ, НЕЙТРОН, СТАНДАРТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ МОДЕЛЬ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО, СВЕРХВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ, РЕДКИЕ РАСПАДЫ, НИЗКОФОНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2018 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

**1 Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал».** В 2018 году были продолжены работы по развитию научного экспериментального комплекса и инфраструктуры Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) и созданию на его базе нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (проект Baikal-GVD).

Важнейшим научным результатом, полученным за отчетный период, является развертывание и запуск в эксплуатацию на оз. Байкал третьего кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD. С вводом его в эксплуатацию число оптических модулей было увеличено до 864, а эффективный объем телескопа Baikal-GVD достиг значения 0.15 км<sup>3</sup>, что уже составляет порядка 37.5% от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливней от нейтрино астрофизической природы, и стал крупнейшим по этому показателю нейтринным телескопом в Северном полушарии.

В этом же году в составе телескопа был запущен и использован в задачах межкластерной калибровки второй сверхмощный (мощность порядка  $10^{15}$  фотонов/импульс) импульсный источник света на основе твердотельного лазера.

Была продолжена работа по совершенствованию компьютерных программ управления телескопом, анализа и обработки данных. В течение 2018 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды

На основе полученных экспериментальных данных по регистрации нейтрино в 2018 г. и в предыдущие годы были продолжены исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких ( $E > 10$  ТэВ) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи. В программу исследований также были включен анализ данных в рамках международного сотрудничества в новом научном направлении “multi-messenger astronomy”. Выполнен анализ экспериментальных данных с целью выделения нейтринного сигнала, совпадающего с событием GW180718 зарегистрированным гравитационными антеннами LIGO и VIRGO. Получены ограничения на величину ожидаемого потока нейтрино от подобных источников частиц

**2 Задача «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории» (выполняется совместно с Филиалом Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН).** Объектом исследования является нейтринное излучение Солнца.

Цель работы – проведение солнечных измерений на ГГНТ и подготовка условий для выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино.

Для подготовки условий выполнения экспериментов с искусственными источниками нейтрино продолжалась калибровка потоком солнечных нейтрино Установки с двухзонной галлиевой мишенью, предназначенной для проведения эксперимента BEST. В 2018 году все измерения скорости захвата солнечных нейтрино выполнялись на Установке. Получены предварительные результаты скорости захвата

для каждой зоны и их объединенный результат. Величины скорости захвата в зонах Установки хорошо согласуются между собой, а их объединенный результат - с предыдущими измерениями на ГГНТ.

Получена величина скорости захвата солнечных нейтрино на галлии за период измерений с 1990 по июнь 2018 годы. Для 270 наборов солнечных данных за 28,5 лет измерений выполнен анализ по поиску возможных временных модуляций и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии. Анализ не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных или сезонных вариаций. Данные согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

В рамках подготовки условий для проведения экспериментов с искусственными источниками разработано дополнительное оборудование для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника.

**3 Задача «Проблема геофизических нейтрино».** Работа выполнялась в рамках программы обоснования создания большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории для регистрации геонейтрино и других природных потоков нейтрино и антинейтрино. Продолжаются работы по измерению содержания  $^{14}\text{C}$  в жидких сцинтилляторах в низкофоновой лаборатории БНО при помощи детектора малого объема. Измерения необходимы для разработки сцинтиллятора, не содержащего  $^{14}\text{C}$ , для детектора большого объема.

Разработана модель фона детектора, используемого для измерений концентрации  $^{14}\text{C}$ . Проводится работа по более точному моделированию процесса регистрации фотонов в детекторе. Создана оптическая модель детектора.

Проведены измерения концентрации радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  в образце сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола объемом 1.36 л. Двумя методами анализа были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, результат  $(5.5 \pm 1.1) \times 10^{-16}$  и  $(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-16}$  ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ).

**4 Задача «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд в Галактике на детекторах АНС и LVD».** На подземных сцинтилляционных детекторах ИЯИ РАН: АСД (Артемовск, Украина), LVD и OPERA/NEWSdm (Гран Сассо, Италия) ведутся исследования в области нейтринной физики, физики космических лучей и астрофизики. Основной целью экспериментов АСД и LVD является поиск нейтринного излучения от

гравитационных коллапсов звезд в Галактике и Магеллановых облаках. Регистрация всех типов нейтрино является уникальной особенностью этих установок.

По данным работы нейтринных телескопов ИЯИ РАН: АСД (Артемовской Научной станции) и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 41 года (1977 - 2018) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.2 года на 90% уровне достоверности.

Получены сезонные вариации интенсивности мюонов за 25 лет по данным детектора LVD. Найдены максимумы и минимумы интенсивности мюонов.

Выполнены расчеты моделирования взаимодействий нейтрино и антинейтрино с ядрами железа установки LSD и окружающего ее грунта, позволяющие определить отклик детектора на взаимодействие нейтронов с веществом детектора. Дальнейшие расчеты позволят объяснить форму энергетического распределения зарегистрированных событий на LSD во время вспышки Сверхновой SN1987A.

**5 Задача «Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей».** В данной теме исследуются основные проблемы физики космических лучей ультра-высоких энергий: их спектр, массовый состав и источники. Исследования основаны на анализе данных эксперимента Telescope Array с помощью современных методов математической статистики и численного моделирования. Результаты включают в себя в том числе спектр космических лучей построенный в широком диапазоне энергий:  $2 \times 10^{15}$  эВ -  $2 \times 10^{18}$  эВ одним экспериментом, а также указание на вариацию спектра космических лучей ультра-высоких энергий в зависимости от направления их прихода.

**6 Задача «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов шал и взаимодействий адронов при энергиях  $10^{15}$  -  $10^{18}$  Эв».** В связи с появлением новых экспериментальных данных на Большом Адронном Коллайдере (БАК, LHC), проведена дальнейшая отработка программного пакета FANSY 2.0, разработанного для детального моделирования взаимодействий адронов при энергиях  $10^{11}$  –  $10^{20}$  эВ. FANSY 2.0 с относительно хорошей точностью воспроизводит широкий набор экспериментальных данных, полученных на ускорителях при низких энергиях и LHC при сверхвысоких энергиях по генерации различных вторичных частиц в разных кинематических областях, оказывающих влияние на развитие ШАЛ и содержащих u,d,s,c кварки (пионы, каоны, нуклоны и барионы, мезонные и барионные резонансы). В

частности, воспроизводятся результаты экспериментов при низких энергиях в мезон-протонных взаимодействиях в области значений  $x_F \sim 0.01 - 0.9$ , наиболее эффективной при развитии каскадов от первичных космических частиц.

Показано, что в спектре ПКИ доля протонов и ядер гелия при энергиях  $E_0 \sim 10^{13} - 10^{14}$  эВ (~15%) остается весьма существенной.

Сравнение данных LHC по азимутальной асимметрии заряженных адронов и результатов моделирования компланарности энергетически выделенных частиц (ЭВЧ) при сверхвысоких энергиях показывает их непротиворечивость друг другу и указывает на необходимость использования новой концепции компланарности, а именно – уменьшения компонент поперечных импульсов частиц, направленных перпендикулярно плоскости компланарности. Концепция может быть проверена экспериментально на детекторе CASTOR LHC.

**7 Задача «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей  $10^{11} - 10^{20}$  эВ» (выполняется совместно с Филиалом Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН).** Исследования проводятся на установке Ковер Баксанской нейтринной обсерватории, на которой в настоящее время реализуется новый проект Ковер-3. В отчете приведены некоторые результаты эксперимента по изучению вариаций космических лучей во время гроз, проводимого на установке Ковер в течение многих лет. Кроме того, приведены предварительные результаты анализа данных, полученных в рамках реализации эксперимента Ковер-3 в области гамма-астрономии.

**8 Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ (выполняется совместно с Филиалом Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН).** В 2018 году по данной теме было запланировано выполнение следующих работ: проведение поиска нейтринных всплесков от взрывов сверхновых с коллапсом ядра в Галактике и изучение фона для таких событий; поддержание установок БПСТ, “Ковёр-2” и “Андырчи” в работоспособном состоянии; продолжение непрерывного набора информации на установках, мониторинг потоков частиц космического излучения высоких и сверхвысоких энергий. Выполнение запланированных научных исследований было осложнено стихийным бедствием – селом в Баксанском ущелье, в результате которого произошел подъем воды в реке Баксан и подтопление Мюонного

Детектора (МД). Тем не менее, с учетом меньшего времени набора информации с МД, все запланированные исследования выполнены.

***9 Задача «Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO»***

Работы по созданию высокогорной установки нового типа в 2018 г. проводились в соответствии с планом работ. Были выполнены методические работы по тестированию эн-детекторов в реальных условиях высокогорья, отладка системы сбора данных и он-лайн программы, математическое моделирование эксперимента. Получен предварительный результат по измерению массового состава космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ. Проводился непрерывный мониторинг природного потока тепловых нейтронов с помощью эн-детекторов в месте проведения эксперимента. Обнаружен отклик эн-детекторов на землетрясения.



## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ .....	3
СОДЕРЖАНИЕ .....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	11
1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал.....	19
2 Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской Нейтринной Обсерватории.....	23
2.1 <i>Анализ результатов измерения приходящего на Землю интегрального потока солнечных нейтрино с энергией &gt; 0.233 МэВ</i> .....	23
2.1.1 Поиск возможных временных и сезонных вариаций солнечного нейтринного потока .....	23
2.1.2 Продолжение измерений скорости захвата солнечных нейтрино на установке с двухзонной галлиевой мишенью .....	26
2.1.3 Регенерация галлия для сохранения чувствительности ГГНТ .....	27
2.2 <i>Разработка и монтаж дополнительного оборудования для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника в специальной облучательной установке для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях</i> .....	27
3 Проблема геофизических нейтрино .....	28
3.1 Детектор геонейтрино.....	28
3.2 Проблема фонов в сцинтилляторе .....	28
4 Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в галактике на детекторах АНС и LVD.....	30
4.1 <i>АСД – 105-тонный сцинтилляционный детектор Артемовской Научной станции</i> .....	33
4.1.1 Ограничение на частоту гравитационных коллапсов .....	33
4.1.2 Фоновые характеристики АСД .....	35
4.2 <i>LVD - Детектор Большого Объёма – поиск нейтринного излучения</i> .....	36
4.3 <i>Взаимодействия нейтрино с ядрами грунта и железа с образованием нейтронов</i> .....	39
5 Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей.....	44
6 Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях $10^{15}$ - $10^{18}$ эВ.....	45
7 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 1011 – 1020 эВ.....	50

8 Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ.....	51
9 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO.....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	63
ПУБЛИКАЦИИ .....	68

## ВВЕДЕНИЕ

*1 Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал».* Если говорить о состоянии работ по созданию крупномасштабных нейтринных телескопов кубокилометрового масштаба в естественных средах (в воде или во льду), то в настоящее время в мире существуют два, кроме Байкальского, финансируемых проекта - IceCube на Южном полюсе и KM3Net в Средиземном море. Из детекторов первого поколения (Байкал НТ-200, AMANDA, ANTARES) в строю еще находится лишь ANTARES, но и он планируется к разборке с 2017 года.

Проект KM3NeT является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в Средиземном море. Первоначально условием финансовой поддержки проекта из общего бюджета стран ЕС являлось объединение усилий всех трех средиземноморских коллабораций (ANTARES, NEMO и NESTOR) для его разработки и реализации. В ходе работы над проектом в период с 2006 года и вплоть до настоящего времени была выработана общая концепция и разработаны основные элементы и системы будущего детектора. Детектор будет состоять из шести независимых блоков, которые планируется развернуть в трех географических районах у берегов Франции, Италии и Греции (по два блока в каждом). Каждый блок представляет собой автономный глубоководный черенковский детектор с эффективным объемом порядка  $0.5 \text{ км}^3$ , содержащий примерно 2000 фотодетекторов размещенных на 115 гирляндах. В настоящее время во Франции и в Италии ведутся натурные испытания прототипов оптических модулей и стринга будущего телескопа. Объявленной целью проекта является развертывание к 2020 году двух блоков с общим эффективным объемом порядка одного кубического километра, а к 2025 году - шести блоков с общим объемом порядка  $3 \text{ км}^3$ .

Наиболее интенсивно развивался проект AMANDA (США, Швеция, Германия), а ныне IceCube, который предусматривал создание черенковского детектора на Южном полюсе путем вмораживания регистрирующих модулей в ледовый массив Антарктиды. Успешное развитие проекта AMANDA позволило убедить правительство и конгресс США в необходимости выделения значительных средств (около 300 млн. долларов США) на создание на Южном полюсе детектора с эффективным объемом порядка кубокилометра. Первый из 86-ти стрингов был заморожен в антарктический лед зимой 2005 года. В последующие годы темпы монтажа установки последовательно нарастали:

в 2009 году было развернуто 19 стрингов, а их общее количество достигло 59-ти. Завершение работ по созданию на Южном полюсе телескопа IceCube и официальная инаугурация проекта произошли 27 апреля 2011 года. В преддверие этого 11 мая 2009 года был выведен из эксплуатации детектор AMANDA, проработавший в общей сложности 9 лет в своей проектной конфигурации.

В настоящее время на телескопе IceCube ведутся исследования широкого спектра проблем астрофизики, космологии и физики элементарных частиц в диапазоне энергий от сотен ГэВ и вплоть до ультравысоких энергий на уровне чувствительности, более чем на порядок превышающем уровень, достигнутый на нейтринных телескопах первого поколения.

Анализ экспериментальных данных накопленных как по мере развертывания телескопа IceCube, так и после ввода его в эксплуатацию в предусмотренном проекте конфигурации привел к серьезному продвижению в задачах поиска нейтрино от астрофизических объектов, регистрации нейтринного потока сопровождающего гамма-всплески, поиска проявлений темной материи, исследования диффузного потока нейтрино и в ряде других задач. Наиболее ярким и значимым для дальнейшей судьбы развития нейтринной астрофизики представляются сегодня результаты анализа набора данных, накопленных в течение трех лет (за период с мая 2010 г. по май 2013 г.), при котором было выделено 37 событий в диапазоне энергий от 30 ТэВ до 2.0 ПэВ, чьи вершины были расположены в выделенном внутреннем объеме телескопа размером 0.4 км<sup>3</sup>. Энергетическое и угловое распределение этих событий, а также относительная доля событий с мюонным треком в полном числе событий хорошо согласуются с ожидаемым эффектом от изотропного потока нейтрино астрофизической природы с энергетическим спектром близким к  $\sim E^{-2}$  и содержащего в равной доле нейтрино всех трех типов - электронного, мюонного и таонного. Этот результат, стал важнейшей вехой в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий, так как он отвечает на вопрос о величине потока нейтрино астрофизической природы и определяет необходимый уровень чувствительности экспериментов при решении задач нейтринной астрофизики высоких энергий.

К 2011 году уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий ( $10^{13} - 10^{18}$ ) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц

темной материи был сформирован, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние годы, начиная с 2009-го) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять чувствительность экспериментальных исследований еще на один-два порядка величины. На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, которая в 2018 г. развернула в озере Байкал и запустила в режим набора данных три из восьми кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба BAIKAL-GVD.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех наиболее крупных действующих нейтринных телескопов по своей эффективной площади и эффективному объему по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий. Дальнейшее сохранение полноправных позиций Байкальского детектора в компании мировых лидеров будет уже зависеть от темпов реализации этого проекта.

Работы и исследования в 2018 г. выполнялись с участием партнеров по коллаборации «Байкал»: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, Санкт - Петербургский государственный морской технический университет, международный центр ОИЯИ (г.Дубна), с участием специалистов исследовательского центра EvoLogics (Германия), университета (Bratislava, Slovakia) и Технического университета (Prague, Czech Republic).

**2 Задача «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории».** Тема исследования нейтрино по-прежнему остается актуальной в программах исследований ведущих мировых научных центров.

На Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проводятся измерения нейтринного излучения от



термоядерных реакций, протекающих в Солнце. Низкий порог захвата нейтрино на  $^{71}\text{Ga}$  делает галлиевый эксперимент чувствительным к реакции протон-протонного синтеза, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии. ГГНТ входит в мировую сеть подземных телескопов по исследованию потоков нейтрино от Солнца. В настоящее время в мире только два нейтринных телескопа имеют возможность вести мониторинг проходящего на Землю потока  $pp$ -нейтрино. Измерения, проводимые двумя независимыми методами и группами, значительно повышает достоверность получаемых результатов.

С первого солнечного эксперимента Дэвиса поиски вариаций в солнечных измерениях проводились различными независимыми группами исследователей, поскольку подтверждение наличия каких-либо периодических модуляций в солнечных данных будет являться указанием на новую физику за пределами LMA MSW. За последние два десятилетия было много заявлений об обнаружении значимых периодических модуляций на разных частотах в наборах данных солнечных нейтрино в эксперименте Super-K (Япония), результаты которых не подтверждаются анализом участников эксперимента Super-K.

Длительный непрерывный период (28.5 лет) измерений скорости захвата нейтрино на галлии предоставляет возможность проведения анализа по поиску возможных временных и сезонных вариаций в солнечных данных эксперимента SAGE на ГГНТ.

**3 Задача «Проблема геофизических нейтрино».** В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации крайне редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , содержащихся в земных недрах. Надежная регистрация этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли. С другой стороны, рассматривается возможность регистрации нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами C, N, O и F, а затем позитронного распада образовавшихся ядер (так называемый цикл CNO), с помощью крупномасштабного жидко-сцинтилляционного детектора (типа LENA). Измерение

потока этих нейтрино позволит получить важную информацию о химическом составе солнечных недр.

**4 Задача «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд в Галактике на детекторах АНС и LVD».** Эксперименты, осуществляемые в подземных лабораториях, органично дополняют фундаментальные исследования элементарных частиц и их взаимодействий, проводимые на ускорителях. Поиск редких явлений в природе является единственным способом достичь, пусть даже косвенным образом, энергий, где начинают проявляться теория объединения сил и квантовые аспекты гравитации. Такие энергии нельзя получить на ускорителях. Подземные лаборатории обеспечивают очень низкий радиоактивный фон, необходимый для поиска этих редких ядерных и субъядерных явлений.

Космические лучи – галактические и внегалактические частицы – постоянно проникают в атмосферу Земли. Взаимодействие этих частиц с атмосферой приводит к возникновению ливней вторичных частиц, что является значительной помехой для экспериментальных установок, предназначенных для изучения чрезвычайно редких явлений и труднодоступных наблюдений частиц, таких как нейтрино или частиц темной материи.

Роль нейтрино в астрофизических исследованиях является весьма важной. Рождаясь в ядерных реакциях в глубине звезд, эти частицы легко выходят на поверхность, давая ценную информацию о процессах, скрытых от наблюдателя огромными толщами звездного вещества. Получение этой информации и ее правильная интерпретация – задача экспериментаторов, занимающихся нейтринной астрофизикой.

**5 Задача «Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей».** Проблема происхождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) одна из наиболее актуальных и сложных задач в современной астрофизике частиц высоких энергий. Основными направлениями исследований в рамках данной проблемы являются измерение спектра КЛУВЭ, установление их массового состава и источников. Экспериментальные исследования в данной области сильно осложнены из-за малости потока частиц ультравысоких энергий. По этой причине во всех существующих экспериментах свойства частиц ультравысоких энергий определяются косвенным образом по характеристикам широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами в атмосфере Земли. В настоящее время измеренный спектр

КЛУВЭ в целом соответствует предсказаниям теоретических моделей, однако часть его особенностей не имеет общепринятой теоретической интерпретации. Массовый состав КЛУВЭ исследован гораздо слабее спектра: различные экспериментальные техники и различные эксперименты дают не вполне согласующиеся результаты. Существенным препятствием на пути к установлению массового состава КЛУВЭ является отсутствие согласия между современными моделями взаимодействия Источники КЛУВЭ также достоверно не установлены, что связано в первую очередь с неопределенностью отклонения этих частиц в галактических и внегалактических магнитных полях. Исследования в рамках темы "Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей" направлены на решение вышеназванных проблем путем анализа экспериментальных данных эксперимента Telescope Array, который является крупнейшим КЛУВЭ-экспериментом в Северном полушарии.

**6 Задача «Высокоэнергетические исследования астро- и ядернофизического аспектов шал и взаимодействий адронов при энергиях  $10^{15}$  -  $10^{18}$  Эв».** Известно, что среди моделей адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, используемых для моделирования развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере для наземных астрофизических исследований при сверхвысоких энергиях, т.е. выше энергий ЛНС, в настоящее время не существует общепризнанных. Это связано с тем, что эксперименты на ЛНС дают информацию, в основном, о параметрах центральной кинематической области взаимодействий адронов ( $\eta < 5 - 6$ ), которая играет второстепенную роль в развитии ШАЛ. Информация о наиболее важной, т.н. фрагментационной, области ( $x_F > 0.01 - 0.05$ ) во взаимодействиях нуклонов с ядрами имеется только при энергиях ниже 1 ТэВ в Лабораторной (Лаб-) системе, т.е. при  $\sqrt{s} < 50$  ГэВ в системе центра масс (СЦМ). Информация о взаимодействиях мезонов (в первую очередь, пионов и каонов), которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, ещё более скудная.

Кроме того, модели, применяемые для изучения ШАЛ, в определенной степени упрощают себе задачу, воспроизводя рождение только основных адронов. Например, только последняя версия SIBYLL воспроизводит рождение чармированных адронов. Кроме того, очень редко учитывается генерация мезонных и барионных резонансов, которые дают вклад в генерацию мюонов, которые, в свою очередь, являются важной компонентой ШАЛ, используемой для оценки энергии первичных частиц.

Следует также упомянуть, что стратосферные и высокогорные эксперименты с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) указывают на отклонения предсказаний традиционных моделей, основанных на концепции кварк-глюонных струн (КГС), от экспериментальных данных РЭК по генерации чармированных частиц, а также т.н. компланарной генерации энергетически выделенных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях при сверхвысоких энергиях. На качественном уровне было предложено несколько идей для объяснения эффекта компланарности (начиная с модели полужесткой неупругой двойной дифракции до концепции «кристаллического мира»). К сожалению, ни одна из этих идей не была доведена до количественного уровня.

Таким образом, по-прежнему остается проблема как разработки новых, более адекватных и детальных моделей взаимодействия адронов с нуклонами и ядрами при сверхвысоких энергиях, так и проведения соответствующих новых экспериментальных исследований фрагментационной области при энергиях выше 1 ТэВ в Лаб-системе на высотах гор.

С этой целью в рамках данной научной темы продолжалась разработка и отладка программного пакета FANSY 2.0 QGSJ, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов в интервале энергий от  $\sim 10^{11}$  до  $\sim 10^{20}$  эВ.

**7 Задача «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей  $10^{11}$  –  $10^{20}$  эВ».** В 2018 году в рамках данной задачи проводились дальнейшие исследования вариаций космических лучей во время гроз и сопутствующих эффектов, ранее обнаруженных во время этих исследований на Баксанской нейтринной обсерватории. Кроме того, исполнители принимали участие в эксперименте коллаборации Ковер-3.

**8 Задача «Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ».** На уникальном комплексе экспериментальных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, расположенная над ним ливневая установка “Андырчи” и комплексная ливневая установка “Ковер-2”) в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Для выполнения исследований установки комплекса в течение 2018 года поддерживались в работоспособном состоянии. Проводились работы по модернизации установок. Поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения.

В ночь с четвертого на пятое июля 2018 года, в результате схода селя, поднялся уровень воды в реке Баксан. И хотя наземная часть установки “Ковёр-2” не пострадала (т.к. берег реки вблизи установки был укреплен после схода селя в 2017 году), произошло подтопление Мюонного Детектора (впервые за 20 лет после окончания строительства здания МД). Вода прибывала в течение 3-х суток, коррелировано с уровнем воды в реке. Уровень воды в подземных тоннелях МД оказался разным, больше всего воды было в первом, ближнем к реке, туннеле. Восстановительные работы продолжались три месяца, в течение которых набор информации и наладочные работы в МД было невозможно проводить. Тем не менее, с поправкой на время набора экспериментальных данных, были выполнены все запланированные исследования.

Создан архив экспериментальных данных установок за 2018 год. По экспериментальным данным БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в Галактике. Проводилось изучение источников фона при поиске вспышек от взрывов сверхновых с коллапсом ядра. Измерен поток быстрых нейтронов на внутренних плоскостях БПСТ.

***9 Задача «Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO».*** Основной задачей в данном проекте является измерение энергетического спектра и химического состава космических лучей в области т. н. «излома» спектра в ПэВной области энергий. Предложенные нами проекты PRISMA и PRISMA-LHAASO на основе разработанных нами ранее специализированных электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов) призваны решить эту наиважнейшую проблему физики космических лучей. Для этой цели совместно с китайскими учеными создается установка нового типа в рамках международного эксперимента LHAASO в Тибете на высоте 4410 м над уровнем моря.



## *1 Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз.*

### *Байкал*

Научный руководитель чл.-корр. РАН Г.В. Домогацкий

В 2018 году ИЯИ РАН совместно с членами коллаборации «Байкал» были выполнены следующие работы по теме «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал»:

- 1) завершены лабораторные испытания 288 оптических и 40 электронных управляющих модулей для развертывания третьего кластера телескопа Baikal-GVD в течение зимней экспедиции на озеро Байкал (февраль-апрель 2018 г.);
- 2) осуществлена транспортировка научного и технологического оборудования на озеро Байкал и подготовка к работам экспедиции;
- 3) осуществлены развертывание ледового лагеря на 106 км КБЖД в 4 км от берега озера Байкал и размещение 40 приезжих российских и зарубежных специалистов в зданиях на 106 и 107 км КБЖД;
- 4) в марте-апреле 2018г. установлен и запущен в режим регистрации и набора данных третий полномасштабный кластер из 288 оптических (регистрирующих) модулей;
- 5) устранены выявленные недостатки и проведен ремонт управляющих и оптических модулей на первом и втором кластерах телескопа (подъем, разборка гирлянд, замена неисправных модулей, тестирование, погружение, настройка, запуск в режим набора данных);
- 6) установлен в состав телескопа импульсный светодиодный лазер в глубоководном исполнении для проверки работоспособности и синхронизации элементов регистрирующей системы телескопа
- 7) продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных нейтринного телескопа Baikal-GVD. В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS, разработана и реализована автоматизированная процедура формирования события из данных отдельных секций;

- 8) проведены экспериментальные исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких ( $E > 10$  ТэВ) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи.
- 9) изготовлены и введены в эксплуатацию новые испытательные стенды долговременного автоматизированного тестирования систем телескопа
- 10) существенно улучшены технология и условия производства и испытаний оптических модулей, что позволило удвоить годовой выпуск до 600 штук в год и повысить качество высокотехнологичной продукции;
- 11) полностью введен в эксплуатацию новый модульный Береговой центр сбора данных и управления телескопом;

Введенная в режим регистрации и накопления данных установка 2018 года из 3 кластеров содержит в общей сложности 856 оптических модулей, размещенных на 24 вертикальных гирляндах (по 8 гирлянд в каждом кластере) в интервале глубин от 750 до 1275 метров. Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации 2018 г., является глубоководным детектором с эффективным объемом порядка 0.15 км<sup>3</sup> для регистрации ливней заряженных частиц, вызываемых потоками нейтрино высоких энергий астрофизической природы, существование которых было подтверждено в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube.

Оптические модули установки включают в себя фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных светодиода. Каждая из гирлянд содержит 36 ОМ, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих три секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала. Кластер связан с береговым центром управления и сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км, включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки. Временная синхронизация измерительных каналов установки осуществляется засветкой оптических модулей световыми вспышками трех калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на центральной и одной из периферийных гирлянд кластера, а также с использованием световых

импульсов калибровочных светодиодов, размещенных в каждом оптическом модуле. Пространственное положение фотодетекторов установки контролируется с помощью акустической системы позиционирования, разработанной фирмой EvoLogics (Германия). Оборудование, предназначенное для долговременного мониторинга гидрофизических параметров глубинных вод оз. Байкал размещено на отдельной инструментальной гирлянде.

В течение 2018 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды

На основе полученных экспериментальных данных по регистрации нейтрино в 2018 г и в предыдущие годы были продолжены исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких ( $E > 10$  ТэВ) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи. В программу исследований также были включен анализ данных в рамках международного сотрудничества в новом научном направлении “multi-messenger astronomy”. Выполнен анализ экспериментальных данных с целью выделения нейтринного сигнала, совпадающего с событием GW180718 зарегистрированным гравитационными антеннами LIGO и VIRGO. Получены ограничения на величину ожидаемого потока нейтрино от подобных источников частиц.

В течение 2018 г. был продолжен анализ экспериментальных данных, полученных на 1 и 2 кластерах за 2016 и 2017 годы. В задаче поиска каскадов, вызванных нейтрино астрофизической природы, был проведен анализ 686 млн. событий соответствующий 182 дням живого времени набора данных. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 57 событий с восстановленной энергией ливней выше 10 ТэВ и 5 событий с энергией выше 100 ТэВ, удовлетворяющих всем критериям отбора. Все выделенные события с энергией выше 100 ТэВ, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 15 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 38. Вероятность

регистрации подобного события от нейтрино астрофизической природы сопоставимо с вероятностью регистрации фонового события от атмосферных мюонов.

Выполнен анализ нейтринных событий, зарегистрированных на глубоководном нейтринном телескопе NT200 в оз. Байкал за пять лет наблюдений в направлении на темные карликовые галактики Южной полусферы (dSphs) и на Большое Магелланово Облако (LMC). Этим анализом завершается цикл работ по данным NT200 в поиске сигнала от аннигиляции темной материи в астрофизических объектах. Не обнаружено какого-либо значимого превышения в числе наблюдаемых событий относительно ожидаемого фона от атмосферных нейтрино во всех тестируемых направлениях -- в двадцати двух галактиках dSphs и в галактике LMC. Для ансамбля из пяти отобранных карликовых галактик мы сделали комбинированный анализ данных методом максимального правдоподобия. Получив соответствие наблюдения нулевой гипотезе о присутствии только фоновых событий, мы установили верхние пределы на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи с массой от 30 ГэВ до 10 ТэВ в нескольких каналах аннигиляции как в комбинированном анализе отобранного набора галактик так и в анализе в направлении LMC. Наиболее сильные ограничения были получены для направления на галактику LMC в канале аннигиляции в пару нейтрино.

Проведен полный расчет и получены ограничения на сечения процессов аннигиляции частиц темного вещества с массой до 10 ТэВ по данным телескопа NT200 за пять лет наблюдений в направлении на галактику Большое Магелланово Облако (LMC), являющейся ближайшим и самым большим спутником нашей Галактики, и в направлениях четырнадцати классических и восьми сверхслабых темных сфероидальных галактик Южной небесной полусферы. Получены ограничения на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи частиц с массой в диапазоне 30 ГэВ - 10 ТэВ и с распределением плотности по модели Navarro-Frenk-White, соответствующей стандартной космологической модели. Наиболее строгие ограничения получены в прямом нейтринном канале аннигиляции из шести рассмотренных лептонных и адронных каналов, на уровне  $10^{-22}$  см<sup>3</sup> сек<sup>-1</sup> для больших масс. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей.

Распространение нейтрино высоких энергий (выше 10 ГэВ) от астрофизических источников до уровня детектора рассчитано с учетом осцилляций нейтрино на длинной

базе при их распространении в Земле. Все результаты получены с учетом статистических и систематических погрешностей, а также с оценкой астрофизических неопределенностей. Для оценки чувствительности телескопа NT200 использовался численный подход с псевдо-экспериментами и максимизация отношения правдоподобия для нулевой гипотезы («только фон») и альтернативной. Вывод верхних пределов на 90% д.у. по данным NT200 за пять лет наблюдений был сделан в приближении хи-квадрат в численном решении уравнения для отношения правдоподобия. Полученные результаты по нейтринным событиям от LMC подтверждают потенциал этого источника аннигиляций сравнимым с тем, что оценивается от центра Галактики. Показано, что ожидаемые предельные значения сечений для масс частиц темной материи выше 1 ТэВ для телескопа гигатонного объема GVD сильнее на два порядка, чем у предыдущего телескопа NT200 и сравнимы с результатами действующих больших телескопов на Южном полюсе и в Средиземном море. Нами был сделан комбинированный анализ максимальной вероятности сигнала по пяти из двадцати двух темных галактик, выбранных по наибольшему значению астрофизического фактора. Получено, что данные соответствуют нулевой гипотезе «только фон» и, что новые верхние пределы на сечения аннигиляции в объединенном анализе более строгие в сравнении с индивидуальными галактиками.

Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта «Рациональное природопользование».

## ***2 Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской Нейтринной Обсерватории***

### ***2.1 Анализ результатов измерения приходящего на Землю интегрального потока солнечных нейтрино с энергией $> 0.233$ МэВ***

#### ***2.1.1 Поиск возможных временных и сезонных вариаций солнечного нейтринного потока***

В 2018 году был выполнен анализ по поиску возможных временных и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии в солнечных данных за весь период наблюдений в эксперименте SAGE на ГГНТ. Поиск периодичностей выполнялся



методом периодограммы Ломба-Скаргла (LS) для неравномерно распределенных данных.

На Рисунке 2 представлена периодограмма спектра мощности LS, полученная для 270 солнечных измерений за период с 01.1990 по 06.2018. В качестве времени солнечных измерений использовалось среднее время экспозиции. Диапазон частот периодограммы 0.04 – 9.6 /год. Частота 0.035 /год соответствует одному полному периоду – 28.5 лет, а частота 9.5 /год (т.н. две частоты Найквиста), вычисляемая из отношения полного числа наборов данных измерений - 270 к полному интервалу времени измерений - 28.5 лет, и соответствует периоду 38.5 дня. В периодограмме найден один пик максимальной мощностью 6.23 при частоте 8.47 /год, что соответствует периоду 43.2 дня, вероятность, что этот пик - случайный шум, составляет 57%.

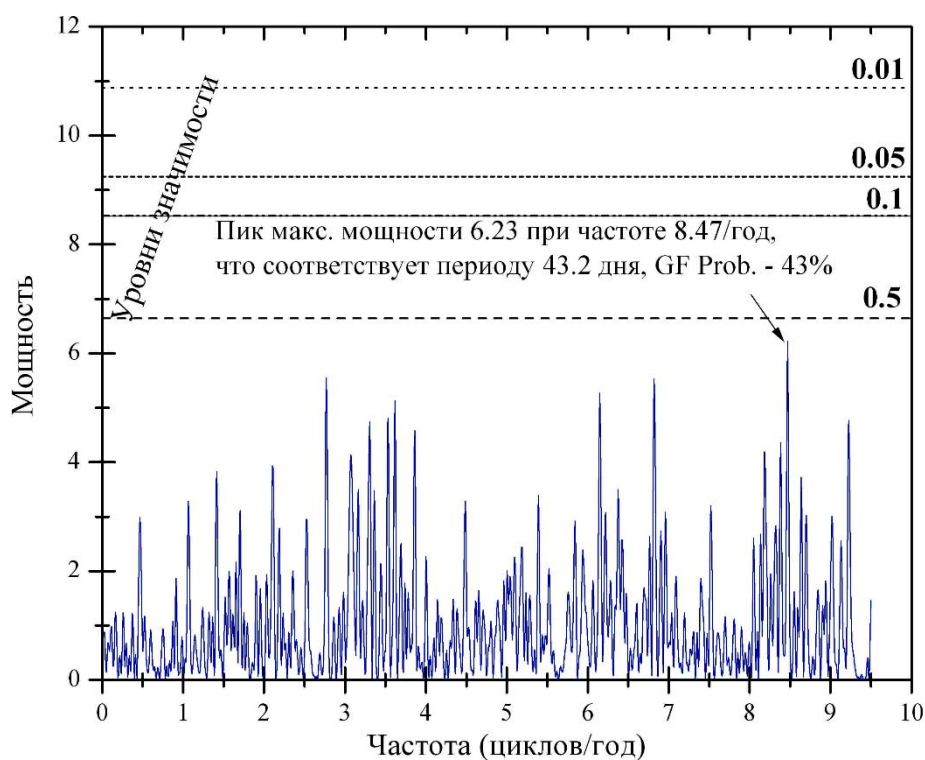


Рисунок 2.1 - Периодограмма спектра мощности Ломба-Скаргла для данных SAGE за период с 01.1990 по 06.2018. Горизонтальные пунктирные линии обозначают уровень значимости мощности.

Для проверки значимости полученной частоты с такой мощностью, имеющиеся данные скорости захватов случайным образом перемешивались по времени и для «новых» данных считался спектр мощности и находился его максимум. Было выполнено 1000 таких перемешиваний результатов 270 солнечных ранов. На Рисунке 2.2 представлена гистограмма распределения максимумов мощности полученных спектров. Доля случайно перемешанных наборов с величиной максимальной мощности 6.23, найденной в солнечных данных, составляет 57%.

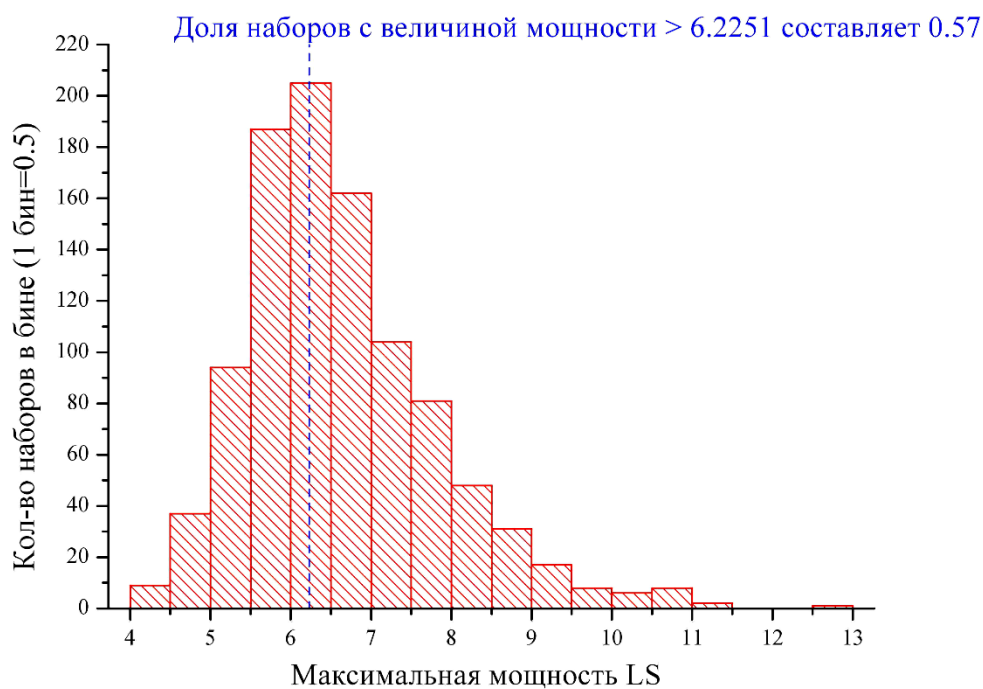


Рисунок 2.2 - Гистограмма максимальных мощностей для 1000 случайных перемешиваний 270 результатов солнечных измерений.

Таким образом получено дополнительное подтверждение, что в солнечных данных ГГНТ за период с 01.1990 по 06.2018 метод периодограмм LS не выявил каких-либо статистически значимых пиков мощности, соответствующих временным вариациям в данных.

К данным, объединенным по годам (Рисунок 3), был применен метод  $\chi^2$  в предположении, что данные соответствуют постоянной скорости захвата  $64.5^{+2.4}_{-2.3}$  SNU. Получена величина  $\chi^2/\text{DOF}=19.05/28 = 0.68$ , вероятность которой составляет 89.7%, что подтверждает предположение о постоянстве потока солнечных нейтрино с вероятностью 89.7%.

Анализ по поиску возможных временных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии, примененный для 270 солнечных измерений ГГНТ, за период наблюдений 28.5 лет, не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных вариаций. Данные хорошо согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

### ***2.1.2 Продолжение измерений скорости захвата солнечных нейтрино на установке с двухзонной галлиевой мишенью***

Установка с двухзонной галлиевой мишенью (далее Установка) состоит из двух концентрических емкостей с цилиндрическим каналом для размещения источника в центре мишеней. Внутренняя зона - сфера, содержащая около 7,5 тонн галлия. Внешняя зона – цилиндр, содержащий около 42 тонн галлия.

Измерение скорости захвата на Установке отличается от измерений на ГГНТ следующими особенностями:

- перед солнечной экспозицией вносится в два раза больше носителя, по ~210-250 мкг в галлиевые мишени цилиндра и сферы;

- извлечение проводится отдельно из сферы и цилиндра с использованием отдельных технологических и транспортировочных систем, что несколько удлиняет время процесса;

- извлеченные из галлиевых мишеней цилиндра и сферы атомы  $^{71}\text{Ge}$  помещаются в индивидуальные пропорциональные счетчики, счет проводится отдельно.

В соответствии с программой ежемесячных измерений скорости захвата солнечных нейтрино в 2018 году выполнено на Установке 12 извлечений. В отчете представлены только завершённые измерения извлечений 2018 года.

Получены предварительные результаты объединенного анализа данных с января по сентябрь 2017 года. В анализ включены измерения, завершённые или имеющие продолжительный счет (в результатах приводятся только статистические ошибки):

$90.2^{+24.6}_{-22.5}$  SNU - скорость захвата в галлиевой мишени внешнего цилиндра,

$69.6^{+88.3}_{-69.6}$  SNU - скорость захвата в галлиевой мишени внутренней сферы,

$86.8^{+23.6}_{-21.7}$  SNU - объединенный результат, сфера + цилиндр.

Величина скорости захвата нейтрино за весь период наблюдения с января 1990 года по июнь 2018 (270 измерений, измерения из сферы не включены в объединенный анализ солнечных данных) составляет  $64.6^{+2.4}_{-2.3}$  SNU (приведены только статистические ошибки).

На Рисунке 2.3 представлены результаты 270 измерений, объединенных по годам.

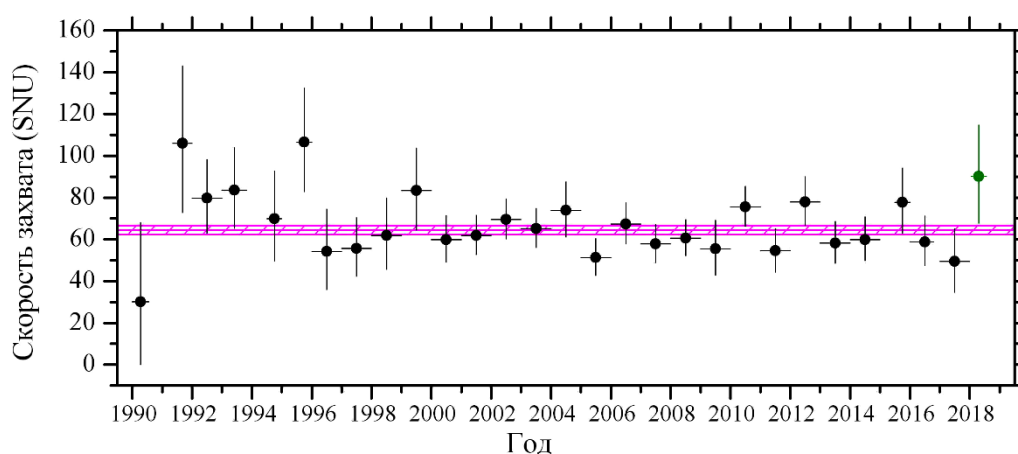


Рисунок 2.3 - Результаты 270 солнечных измерений, объединенных по годам.

Заштрихованная область соответствует объединенному результату  $64.6^{+2.4}_{-2.3}$  (стат.) SNU. Вертикальные линии в каждой точке соответствуют статистической ошибке 68%, горизонтальные – временному интервалу объединенного анализа измерений. Зеленый цвет – предварительный результат измерений 2018 г в цилиндрической мишени Установки:  $90.2^{+24.6}_{-22.5}$  SNU

### 2.1.3 Регенерация галлия для сохранения чувствительности ГГНТ

В 2018 году проводились работы по регенерации галлия. Для повышения чувствительности ГГНТ в 2018 году поставлено около 6000 кг высокой чистоты галлия марки ГЛ-99,9999.

### 2.2 Разработка и монтаж дополнительного оборудования для безопасного управления и размещения высокоинтенсивного источника в специальной облучательной установке для исследования осцилляционных свойств нейтрино на очень коротких расстояниях

Было разработано оборудование, обеспечивающее безопасную работу с интенсивными источниками нейтрино.

Для обеспечения безопасной и эффективной работы при проведении измерений с ППД разработан и создан Лабораторный контейнер, включающий свинцовую и вольфрамовую защиту с двумя крышками. Крышка сверху, чтобы устанавливать и удалять источник из контейнера, Крышка (шибер) сбоку, для открытия источника в направлении установленного ППД. Внутри защиты расположена вращающаяся платформа, дающая возможность поворота источника внутри защиты на фиксированные углы ( $45^0$ ,  $90^0$ ,  $180^0$ ) по вертикальной оси. В настоящее время Лабораторный контейнер смонтирован по месту его использования в эксперименте с источником.

### ***3 Проблема геофизических нейтрино***

#### ***3.1 Детектор геонейтрино***

В качестве детектора геонейтрино предлагается использовать жидкосцинтилляционный детектор объемом от несколько килотонн до нескольких десятков килотонн. Объем детектора определяется необходимой статистикой регистрируемого эффекта. Проведенное моделирование показало, что 25 кт·лет измерений достаточно, чтобы сделать выводы о количестве урана и тория в Земле о их распределении внутри.

Создание сцинтиллятора, принципиально не содержащего  $^{14}\text{C}$  позволяет измерить вклад от потока калиевых антинейтрино ( $^{40}\text{K}$ ).

#### ***3.2 Проблема фонов в сцинтилляторе***

В сцинтилляторах для исследования слабых нейтринных потоков очень важной характеристикой является радиационная чистота. На сегодняшний день самый чистый сцинтиллятор используется в детекторе BOREXINO. По содержанию урана и тория его чистота доходит до  $10^{-18}$  г/г.

Однако, этого недостаточно для изучения низкоэнергетических событий ( $< 150$ - $200$  кэВ), где в качестве фона выступает радиоактивный изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  (граничная энергия бета-спектра  $156.48$  кэВ, а граничная энергия нейтринного спектра от  $pp$ -цикла  $423$  кэВ). Измеренное содержание  $^{14}\text{C}$  в жидком сцинтилляторе находится на уровне

$10^{-18}$  г/г в детекторе BOREXINO, в то время, как расчетное значение находится на уровне  $10^{-21}$  г/г.

Была разработана модель фона для детектора, которая включает 8 компонент и учитывает, что фон естественной радиоактивности не находится в равновесии продуктов распада в цепочках. На рисунке 4 показано измерение за 322.9 часа. Модель фонов очень хорошо описывает представленное измерение.

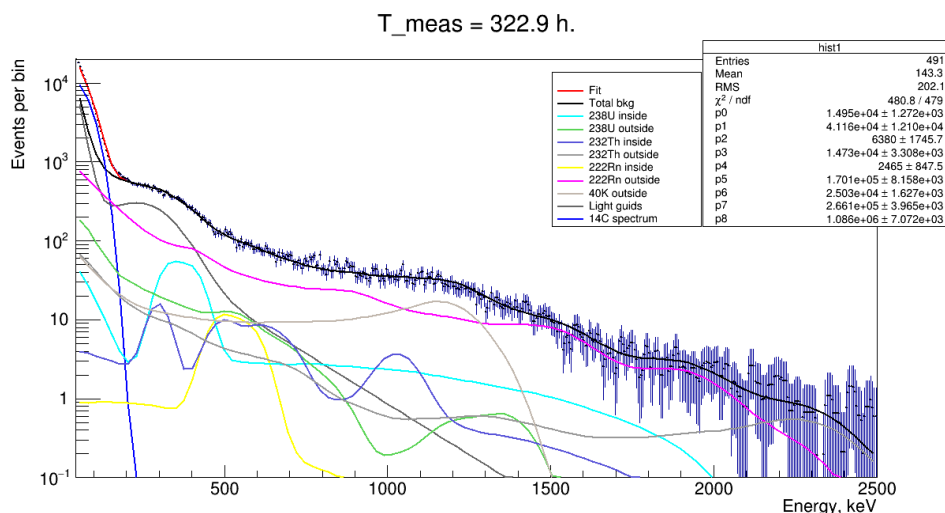


Рисунок 3.1 - Измерения образца сцинтиллятора на основе ЛАБ китайского производства за 322.9 часа. Точки с погрешностью – эксперимент. Показаны вклады от фонов детектора.

Подгонка фонами измеренного спектра позволяет определить загрязненность сцинтиллятора.

Содержание урана и тория определялось путем подгонки измеренного спектра модельными спектрами фона. Внутренний фон от урана обрывается изотопом  $^{234}\text{U}$ , так как период полураспада следующего за ним  $^{230}\text{Th}$  составляет 75400 лет, и последующие продукты не успели накопиться за время после очистки сцинтиллятора (примерно 3-4 года). Коэффициент для интеграла спектра фона  $^{238}\text{U}$  получился из подгонки 2990 за 322.9 часов измерения. Это составляет  $6.4 \times 10^{-4}$  событий в сек. Пересчет в массу ядер урана получается  $2.2 \times 10^{-13}$  г/г. То же для тория 1276 за 322.9 часов или  $1.3 \times 10^{-13}$  г/г.

Другой метод – метод измерения парных событий от продуктов цепочки  $^{232}\text{Th}$   $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  во временном окне 3334 нс что равняется 10 периодам полураспада  $^{212}\text{Po}$ . При этом первые 450 нс вырабатывалась блокировка для исключения послеимпульсов. Тогда эффективность регистрации событий пары  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  составляет 0.648. За 322.9 часов было зарегистрировано 5 событий в районе пика от альфа-частиц  $^{212}\text{Po}$ . Это

приводит к величине  $1.7 \times 10^{-12}$  г/г для содержания  $^{232}\text{Th}$ . Различие в один порядок величины объясняется тем, что метод подгонки спектра фона не является точным и может рассматриваться как приблизительный.

#### ***4 Поиски нейтринного излучения от коллапсов звёзд в галактике на детекторах АНС и LVD***

Исследование нейтринного излучения от коллапса звезд позволит получить информацию о поведении и свойствах вещества в экстремальных условиях ядерной плотности, сверхвысоких температур и давлений, мощных гравитационных полей, образования нейтронных звезд и черных дыр – самых фундаментальных процессов во Вселенной. Начиная с конца 70-х гг., в ИЯИ нами были построены несколько больших подземных сцинтилляционных детекторов, способных измерить нейтринное излучение от коллапса. Это - АСД (1977 г.), БПСТ (1978 г.), LSD (1984 г.), LVD (1992 г.).

Для регистрации гравитационного коллапса необходима длительная непрерывная работа специализированных экспериментальных установок. Установками, способными идентифицировать все типы нейтрино, являются: детектор LVD, в состав которого входит примерно 1 кт железа и 1 кт жидкого сцинтиллятора, и установка «Артемковский Сцинтилляционный Детектор» АСД Артемовской Научной Станции ИЯИ РАН.

В случае осуществления модели стандартного коллапса (МСК) полная энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну.

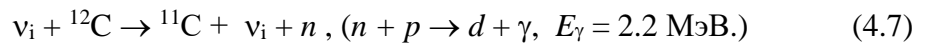
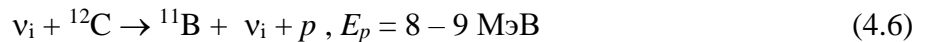
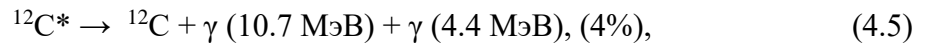
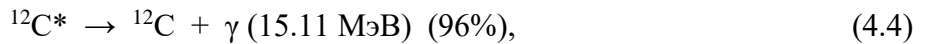
Электронные антинейтрино регистрируются по реакции обратного бета-распада на протонах сцинтиллятора:



Вероятность взаимодействия по этому каналу составляет 83%. Эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением  $\gamma$ -кванта 2.2 МэВ:



Все типы нейтрино ( $\nu_i$ ) взаимодействуют также с углеродом. В случае МСК основной реакцией (13% событий) является реакция возбуждения ядерного уровня углерода 1+ (15.11 МэВ) за счет нейтрального тока и реакции гигантского резонанса:



Еще одна важная реакция, но, значительно с меньшим сечением по сравнению с обратным бета-распадом – упругое рассеяние нейтрино на электроне (3% событий):



Несмотря на то, что МСК разработана достаточно давно, она не в силах объяснить сброс оболочки при взрыве звезды, а также сигнал, полученный в результате вспышки Сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом облаке 23 февраля 1987 г. в 2:52 UT в эксперименте LSD. В связи с этим были разработаны другие модели гравитационного коллапса. Наиболее хорошо двойной сигнал от SN1987A объясняется в рамках модели вращающегося коллапсара (МВК), разработанной В.С. Имшенником [V.S. Imshennik Sp. Sci. Rev. **23**, 779 (1995)], предсказывающей двухстадийное



излучение нейтрино: в первой фазе испускаются электронные нейтрино со средними энергиями 30 – 40 МэВ, во второй – нейтрино всех типов.

В МВК регистрация электронных нейтрино может осуществляться благодаря реакциям:

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z+1) \quad (4.9)$$

$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z+1)^* \quad (4.10)$$

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow \nu_e + (A, Z)^* \quad (4.11)$$

Сечения взаимодействия этих нейтрино с различными ядрами посчитаны в работах [E.V. Bugaev, G.S. Bisnovaty-Kogan, M.A. Rudzsky, Z.F. Seidov. Nucl. Phys. A **324** 350 (1979); E. Kolbe, K. Langanke, S. Krewald Phys. Rev. C **49** 1122 (1994); E. Kolbe, K. Langanke Phys. Rev. C **63** 025802 (2001); Ю.М. Гапонов, О.Г. Ряжская, С.В. Семенов ЯФ **67** 1993 (2004); W. C. Haxton Phys. Rev. D **36** 2283 (1987); M. Fukugita, Y. Kohyama, K. Kubodera, Phys.Lett.B **212** 139(1988)].

Для углерода это реакции:

$$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-, \Delta M = 16.83 \text{ МэВ} \quad (4.12)$$

$${}^{12}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e, \tau = 15.9 \text{ мс}, E_{\text{max}} \approx 16.4 \text{ МэВ} \quad (4.13)$$

$$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+, \Delta M = 13.88 \text{ МэВ} \quad (4.14)$$

$${}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + \nu_e, \tau = 29.3 \text{ мс} \quad (4.15)$$

Электронные нейтрино 30-40 МэВ вступают в реакцию с хлоридом натрия NaCl:

$$\nu_e + \text{Na}^{23} \rightarrow e^- + \text{Mg}^{23}, \quad (4.16)$$

порог примерно 4 МэВ;



порог  $E_{\text{th}} \sim 800$  кэВ для  $\text{Cl}^{37}$  (24.5%) и  $\sim 5$  МэВ для  $\text{Cl}^{35}$  (75.5%).

При взаимодействии электронов с солью высока вероятность рождения ядра  $\text{Mg}^{23}$  в возбужденном состоянии с излучением  $\gamma$ -кванта с энергией примерно 7.5 МэВ. Возможности регистрации нейтрино от взаимодействия с окружающей солью детектором АСД рассматривались подробно в работе [В.В. Бояркин, О.Г.Ряжская, Изв. РАН Сер. физ. **73**, №5, 691 (2009)].

#### ***4.1 АСД – 105-тонный сцинтилляционный детектор Артемовской Научной станции***

##### ***4.1.1 Ограничение на частоту гравитационных коллапсов***

Артемовский Сцинтилляционный Детектор (АСД) расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. (рисунок 4.1). Основной задачей эксперимента является поиск нейтринного излучения от коллапсирующих в нашей Галактике звезд. Масса мишени для поиска нейтринного излучения от коллапсов звезд равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам окружающей детектор соли ( $\text{NaCl}$ ).



Рисунок 4.1 - Установка АСД Артемовской научной станции

Фон естественной радиоактивности соли примерно в 300 раз меньше чем в обычном грунте. Глубина расположения установки также позволяет набирать

статистику взаимодействия нейтронов за относительно короткие сроки, и достаточно велика для экстраполяции полученных данных на другие глубины. Эффективность регистрации замедлившихся до тепловых энергий нейтронов составляет для АСД около 80 %, если источники нейтронов равномерно распределены по объему сцинтиллятора. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр  $(556 \pm 3)$  см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкостного сцинтиллятора на основе уайт-спирита  $C_nH_{2n+2}$ ,  $n = 10$ . Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность –  $0.78$  г/см<sup>3</sup>. По поверхности цилиндра были равномерно вырезаны 144 иллюминатора для 128 ФЭУ-49Б, 16-ти ФЭУ-110 и 16-ти ФЭУ-30. Внутри детектор был оклеен светоотражающей лавсановой пленкой с диффузным покрытием на основе двуокиси титана. Коэффициент отражения покрытия в заполненном детекторе равен 84% на длине волны 420 нм.

Установка АСД способна идентифицировать все типы нейтрино.

Электронные антинейтрино регистрируются по реакции обратного бета-распада на протонах сцинтиллятора:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ,  $E_e = E_\nu - 1.3$  МэВ. Вероятность взаимодействия по этому каналу составляет 83%. Эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с излучением  $\gamma$ -кванта 2.2 МэВ:  $nn + p \rightarrow d + \gamma$ ,  $E_\gamma = 2.2$  МэВ. Также в детекторе АСД нейтроны, рожденные вблизи стенок, захватываются ядрами Cl, входящими в состав окружающей установку соли:  $n + {}^{35}Cl \rightarrow {}^{36}Cl^* + \Sigma\gamma$ ,  $E_\gamma = 5 \div 7$  МэВ. Время захвата нейтронов в АСД равно  $\tau = 170$  мксек. Вероятность захвата 85%. Вероятность регистрации детектором позитрона в реакции (4.1) составляет 99%. Таким образом, АСД с высокой степенью надежности может идентифицировать  $\nu\Sigma$ .

Для отбора кандидатов на нейтринную вспышку установлен следующий критерий отбора событий:

а) в энергетическом диапазоне (5 – 50) МэВ за 20 сек. регистрируются кластеры импульсов (триггеры), которые при вспышке являются результатом детектирования позитронов в реакции (1);

б) триггер открывает временные ворота длительностью  $\Delta t = 512$   $\mu$ с с энергетическим порогом 1 МэВ, т.е. в энергетическом интервале (1 – 5) МэВ регистрируются  $\gamma$ -кванты от реакции захвата нейтрона в реакции (4.2).

Темп счета триггеров ( $> 5$  МэВ), в среднем, составляет 0.5 имп/сек. Темп счета на пороге 1 МэВ  $\sim 2000$  имп/сек.

Сигнал от коллапса идентифицируется по появлению в интервале 20 секунд статистически редкого сгущения импульсов, регистрируемых детектором.

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977г. по 2017г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. Экспериментально получено, что фоновые события распределены по закону Пуассона. Предел на частоту коллапсов на 90% уровне достоверности определяется по формуле:  $1/f_{col} = \Delta T / \ln(0.1)$ , где  $\Delta T$  – время наблюдения.

Таким образом, за  $\Delta T = 40$  лет работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 17.37 года на 90% доверительном уровне ( $f_{col} < 0.057$  года<sup>-1</sup>). Живое время работы детектора на сегодняшний день составляет 80%. За 40 лет наблюдений за нашей галактикой антинейтринных вспышек обнаружено не было.

#### **4.1.2 Фоновые характеристики АСД**

Поскольку эксперимент связан с поиском крайне маловероятных событий, изучение фона установки имеет особое значение. Знание фоновых характеристик важно не только для решения проблемы выделения истинных событий, но и для поиска возможных путей снижения фона. Часть характеристик фона в используемых энергетических диапазонах (1 – 5) МэВ и (5 – 50) МэВ получается ежедневно (рис. 4.2) Это временные распределения импульсов в обоих диапазонах, а также амплитудные спектры. Фон в энергетическом диапазоне 5-50 обусловлен прохождением мюонов космических лучей вблизи стенок детектора, а также регистрацией вторичных частиц, сопровождающих мюоны ( $e$ ,  $\gamma$ ,  $\pi$ ,  $p$ ,  $n$ ). Амплитудный спектр фона в каналах (1 – 50) МэВ обусловлен регистрацией детектором гамма-квантов. Эффективность регистрации нейтронов для реакции (4.2) в этом диапазоне равна 80 %. Основное уменьшение эффективности регистрации нейтронов происходит из-за потерь при регистрации гамма-квантов, из-за того что при выходе  $\gamma$ -кванта из детектора он может дать энерговыделение ниже порогового и из-за введения временного окна 10 – 510 мкс при регистрации  $\gamma$ -кванта.

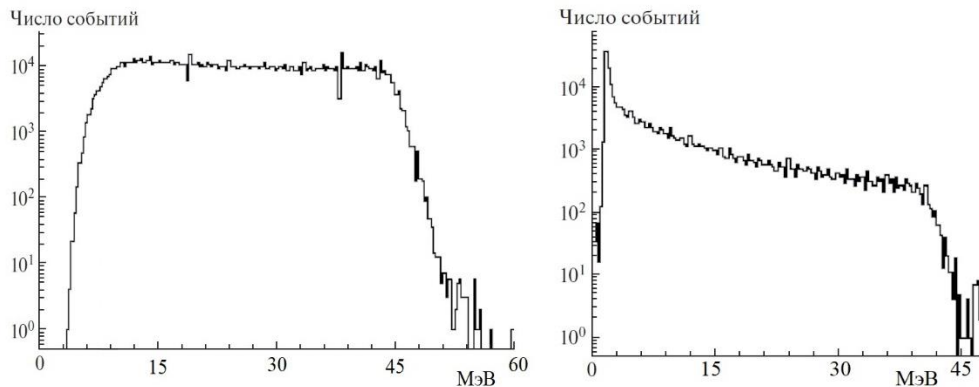


Рисунок 4.2 - Пример амплитудного спектра фона в энергетическом диапазоне 5 - 50 МэВ (правая гистограмма) и 1 - 50 МэВ (левая гистограмма) во временном окне 10 – 510 мкс.

#### ***4.2 LVD - Детектор Большого Объема – поиск нейтринного излучения***

Основная цель эксперимента LVD – поиск нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года. Помимо основной задачи, на установке LVD исследуется поток нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, как источник фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине  $\langle H \rangle = 3650$  м в.э., состоит из сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали с размерами  $100 \times 100 \times 150$  см<sup>3</sup>, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Они размещены по 8 штук в стальных модулях, которые сгруппированы в колонны, имеющие 7 горизонтальных слоёв модулей. Детектор LVD состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой (рисунок 4.3). В такой конфигурации установка работает с 2002 года. Эффективное время работы LVD составляет 99.8% (Рис. 8). Модульная структура установки позволяет проводить регламентные работы по поддержанию детектора в рабочем состоянии без остановки системы сбора информации. Для регистрации нейтринной вспышки от Сверхновой нужна большая масса мишени установки и высокий процент живого времени. LVD удовлетворяет обоим требованиям.



Рисунок 4.3 - Установка LVD

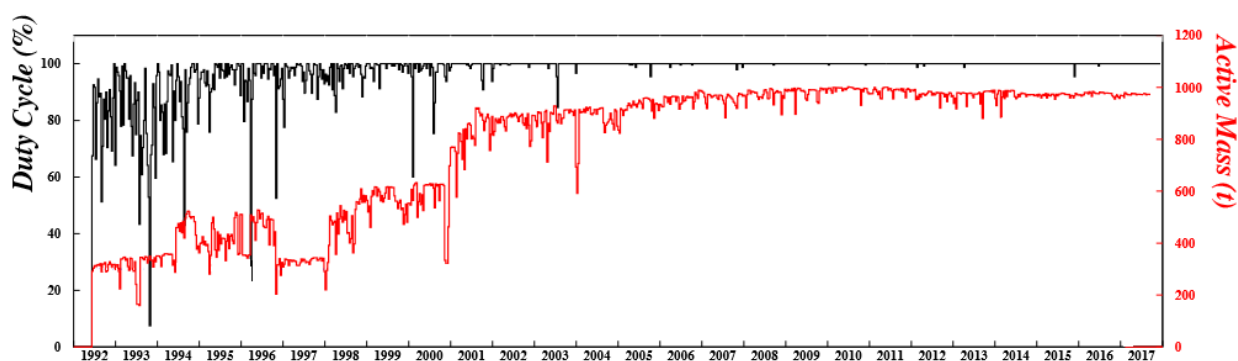


Рисунок 4.4 - Живое время работы и активная масса эксперимента LVD по годам с 1992 по 2017.

В соответствии с различными значениями установленных триггерных порогов регистрации работу LVD можно разделить на 2 периода. В первый период с 6 июня 1992 года по 31 декабря 2005 энергетический порог внутренних счетчиков составлял 5 МэВ. Эти счетчики хорошо защищены от радиоактивности окружающих пород наружными, энергетический порог которых был 7 МэВ. Число внутренних счетчиков составляет 47% от общего числа счетчиков. С 2006 года был установлен порог  $E_{\text{NET}} = 4$  МэВ на все счетчики вне зависимости от их положения.

Установка LVD способна регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом.

Основной реакцией взаимодействия антинейтрино является обратный бета распад (IBD реакция (4.1)), которая создает два детектируемых сигнала: первый сигнал вызывается позитроном (видимая энергия  $E_{vis} = E_{\nu_e} - 1.8 \text{ МэВ} + 2 m_e c^2$ ), следующий за ним – захватом нейтрона ( $E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}$ , среднее время захвата около 185 мкс). Эта реакция дает основной вклад в отклик детектора при реализации МСК. Протоны и альфа-частицы в реакциях  $\nu_e (\bar{\nu}_e)\text{Fe}$  и  $\nu_i\text{Fe}$  от возбужденных ядер  $\text{Co}^*$ ,  $\text{Mn}^*$  и  $\text{Fe}^*$  не регистрируются из-за квантинг-эффекта в сцинтилляторе.

Благодаря наличию в своем составе ядер углерода и железа детектора LVD чувствителен также к нейтрино, взаимодействующим посредством реакций (2, 4, 5, 7, 8). В реакциях (4), (7), (8) участвуют нейтрино всех ароматов.

В эксперименте проводится анализ данных в режимах *on-line* и *off-line*.

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме *on-line* осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20 \text{ с}$  и с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4 \text{ МэВ}$ . Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме *on-line* посылаются в систему SNEWS (Система раннего предупреждения сверхновых). LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме *on-line* с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось.

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме *on-line* осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20 \text{ с}$  и с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4 \text{ МэВ}$ . Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме *on-line* посылаются в систему SNEWS (Система раннего предупреждения сверхновых). LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме *on-line* с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось.

Поиск кластеров  $\bar{\nu}_e$ -событий *off-line* осуществляется в течение временного окна с длительностью  $\Delta t$  до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется  $\Delta t$  и количеством событий внутри  $\Delta t$ . Для каждого кластера, была определена частота имитации  $F_{im}$ . За период с 1992 по 2018 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее  $0.089 \text{ г}^{-1}$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии

до 25 кпк в период наблюдения. Предел на частоту вспышек сверхновых в нашей галактике составляет менее 0.094 коллапсов в год при 90% С.Л.

### ***4.3 Взаимодействия нейтрино с ядрами грунта и железа с образованием нейтронов***

3 февраля 1987 года в Большом Магеллановом облаке вспыхнула сверхновая II типа SN1987A. Астрономами в оптическом диапазоне она была обнаружена в ночь с 23 на 24 февраля. Жидкостной сцинтилляционный детектор (LSD) зарегистрировал нейтринный сигнал 23 февраля в 2:52 всемирного времени. Информация с характеристиками сигнала была послана в Международный Астрономический Союз 28 февраля. Детекторы IMB, Kamiokande II и БПСТ опубликовали данные о своих зарегистрированных событиях спустя 10 дней (IMB и КИ) и через 3 недели – БПСТ. Время регистрации нейтрино этими детекторами было на ~ 5 часов позднее, в 7:35 UT. В детекторе LSD тоже были два импульса в 7:35 UT.

В рамках модели стандартного коллапса основной реакцией регистрации нейтрино  $\bar{\nu}_e$  является обратный бета распад (IBD реакция). В результате этой реакции в сцинтилляторе возникают два сигнала: первый сигнал вызывается позитроном (видимая энергия  $E_{vis} = E_{\nu_e} - 1.8 \text{ МэВ} + 2 m_e c^2$ ), следующий за ним – захватом нейтрона ( $E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}$ , среднее время захвата около 185 мкс). Протоны и альфа-частицы в реакциях  $\nu_e (\bar{\nu}_e)\text{Fe}$  и  $\nu_i\text{Fe}$  от возбужденных ядер  $\text{Co}^*$ ,  $\text{Mn}^*$  и  $\text{Fe}^*$  не регистрируются из-за квантинг-эффекта в сцинтилляторе. До сих пор реакциям с образованием нейтронов ( ${}^A\text{X}(\nu_e, e^-)^{A-1}\text{X}$ ,  ${}^A\text{X}(\bar{\nu}_e, e^+)^{A-1}\text{X}$ , X-ядро) не придавалось большого значения в связи с их небольшим сечением взаимодействия. Интерес к ним повысился после работы [S. Yen, TRIUMF Vancouver, Canada (talk 18-Apr 2017)], в которой было показано, что энергетические характеристики зарегистрированных импульсов соответствуют гамма-квантам от nFe захватов нейтронов, образовавшихся в стальной конструкции установки и в грунте вокруг нее. Это могло бы объяснить сигнал, зарегистрированный детектором LSD.

В детекторе LSD нейтроны регистрируются по  $\gamma$ -квантам, испускаемым в результате радиационного захвата тепловых нейтронов протонами сцинтиллятора ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ,  $\langle n \rangle = 9.6$ ), с энергией  $E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}$ ,  $\tau \approx 180 \text{ мкс}$ , а также ядрами железа структуры LVD, со средней энергией около  $\langle E_\gamma \rangle = 7 \text{ МэВ}$ ,  $\tau \approx 100 \text{ мкс}$ . Энергетический спектр регистрируемых захватных гамма-квантов имеет характерный двугорбый вид



(рисунок 4.5) и не зависит от энергии нейтронов. Спектр формируется под действием энергетического разрешения 30% и неоднородности светосбора.

Доля гамма-квантов от захватов нейтронов ядрами железа установки около 15 %.

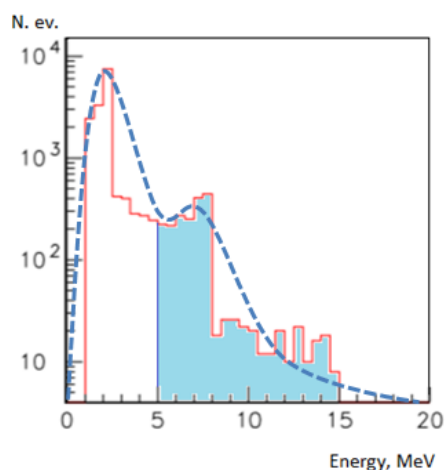


Рисунок 4.5 - Энергетическое распределение гамма-квантов от захватов нейтронов (гистограмма - МК-симуляция, пунктир – сглаженная аппроксимация экспериментальных данных)

Моделирование взаимодействия нейтрино представляет собой трудную задачу из-за небольшого количества экспериментальных и расчетных данных о сечениях взаимодействия нейтрино с ядрами, входящими в состав грунта Монблана. Грунт, массива Монблана в основном состоит из диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ . Процентное содержание элементов показано в таблице 4.1. Содержание урана и тория в грунте Монблана больше чем в осадочных породах в 10 - 100 раз.

На первом этапе моделирования с применением пакета GEANT4 исследовалась способность нейтронов, рожденных в грунте, достичь установки LSD и захватиться ядрами железа детектора.

Было получено, что максимальная толщина слоя грунта, которую может пройти нейтрон до захвата, составляет чуть более 1 метра, причем эта толщина практически не зависит от начальной энергии нейтронов (рисунок 4.6). Расчетная масса грунта, окружающего детектор LSD, для толщины 1 м - около 1000 тонн.

Таблица 4.1 - Химический состав горы Монблан

<i>element</i>	<i>Массовая доля %</i>
SiO <sub>2</sub>	75.4
AlO	13.7
FeO	0.99
NaO	3.73
KO	5.66
CaO	0.74
MgO	0.24

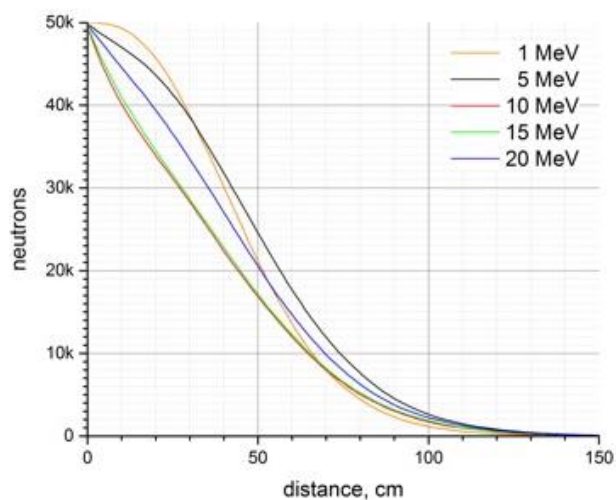


Рисунок 4.6 - Число нейтронов в зависимости от максимального расстояния, на которое распространяются нейтроны от начальной точки: нейтроны:  $neutrons = 5 \cdot 10^4 - \int_0^{distance} n(x') dx'$ , где  $n(x')$  - количество захватов на расстояние  $x'$  от начальной точки.

Были проведены две серии Монте-Карло расчетов. В первой разыгрывались  $10^4$  нейтронов, генерируемых в одно-метровом слое грунта, во второй -  $10^4$  нейтронов, генерируемых в железе установке. Геометрия LSD, используемая при моделировании

транспортным кодом GEANT4, включала в себя реальные размеры установки, массу материалов (сцинтиллятор, железо, пластик, окружающий грунт). В каждой серии расчетов мы изменяли начальную энергию нейтронов в диапазоне от 1 до 8 МэВ.

Энергетические распределения сигналов от захватов нейтронов ядрами железа, зарегистрированных в сцинтилляционных счетчиках LSD показаны на рисунках 4.7 и 4.8. Количество зарегистрированных сигналов от нейтронов, произведенных в стальных конструкциях детектора, показано на рисунках 4.7 а-д. Количества зарегистрированных гамма-квантов от нейтронов, произведенных в граните, окружающем детектор, показано на рисунках 4.8 а-д. Учитывались импульсы гамма-квантов с энергией выше порога регистрации 5 МэВ.

На рисунке 4.7 а вертикальными линиями под осью абсцисс отмечены амплитуды импульсов, зарегистрированных на LSD в 2:52 UT.

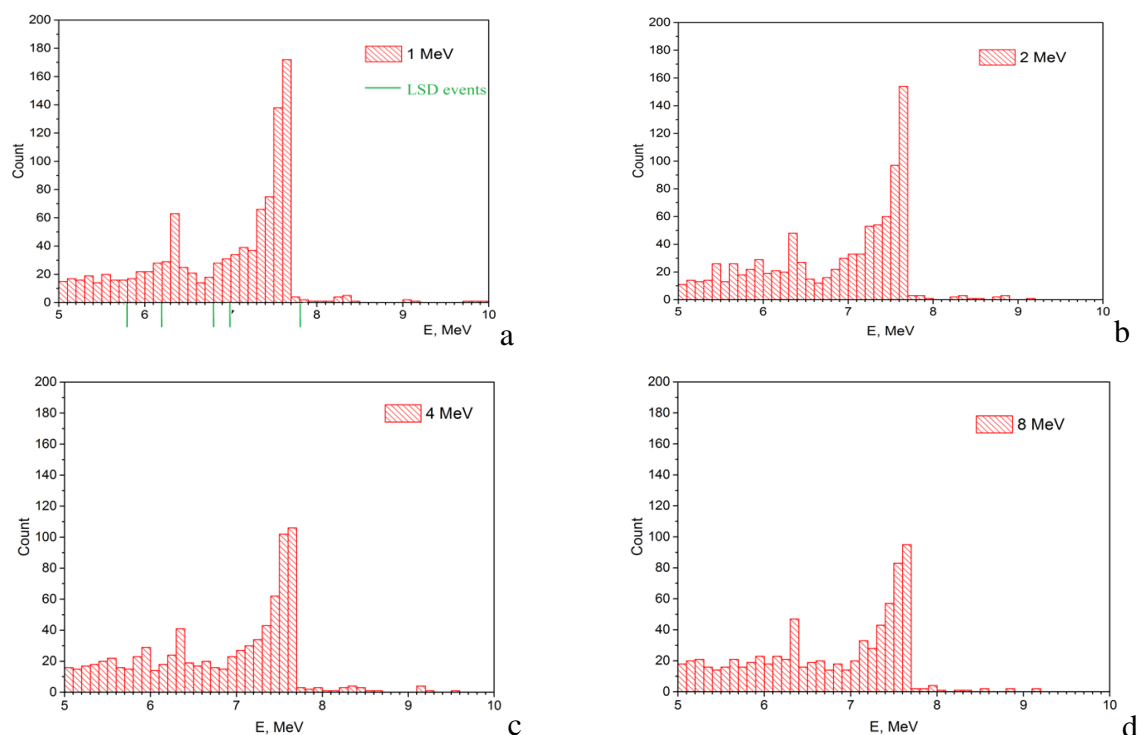


Рисунок 4.7 - Гистограмма событий в счетчиках LSD для нейтронов с начальной энергией 1 МэВ (а), 2 МэВ (б), 4 МэВ (с), 8 МэВ (д) в железе LSD.

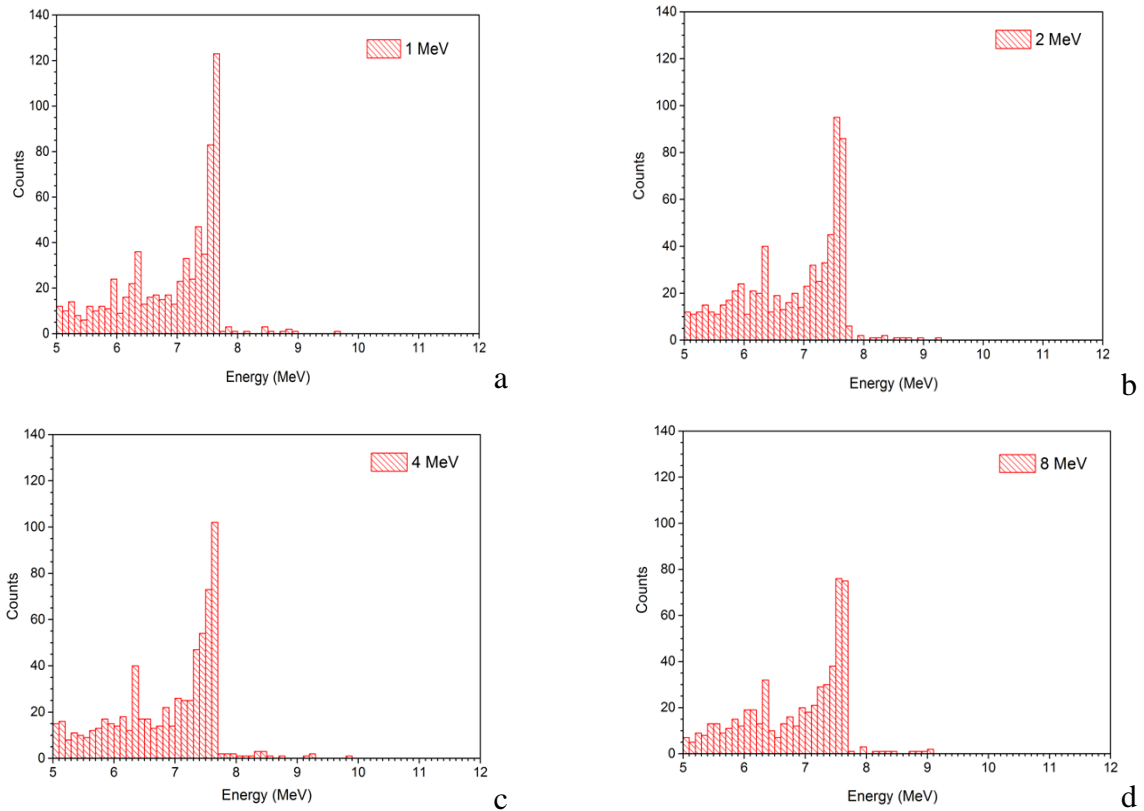


Рисунок 4.8 - Гистограмма событий в счетчиках LSD для нейтронов с начальной энергией 1 МэВ (а), 2 МэВ (б), 4 МэВ (с), 8 МэВ (г) с грунтом, окружающим установку.

Была получена зависимость эффективности регистрации детектором LSD нейтронов от их энергий при пороге 5 МэВ.

Эффективность регистрации для нейтронов, рожденных в стальных конструкциях, представлена на рис. 4.9 а, для нейтронов, рожденных в грунте окружающем установку, - на рис. 4.9 б.

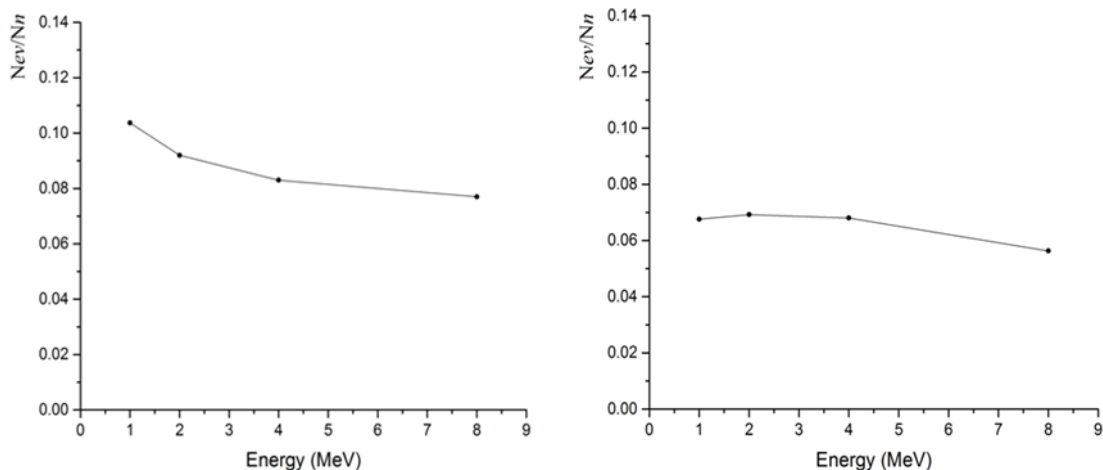


Рисунок 4.9 - Эффективность обнаружения нейтронов, создаваемых в стальных конструкциях (слева) и в окружении грунта (справа).

В случае регистрации установкой LSD взаимодействий антинейтрино (IBD) энергетический спектр импульсов был бы более широким (до  $\sim 30$  МэВ) и практически каждый из импульсов сопровождался бы парным импульсом 2.2 МэВ от захвата нейтрона. Ни того, ни другого не наблюдалось в эксперименте.

Возможным объяснением сигнала LSD является регистрация нейтрино в рамках Модели вращающегося коллапсара Имшенника [V. S. Imshennik and O. G. Ryazhskaya, *Astron. Lett.* 30, 14 (2004)]. В работе [Бояркин В.В., Дисс-ция на соиск. степени к. ф.-м. н (2009) ИЯИ РАН] рассматривались реакции с испусканием гамма-квантов от возбужденных ядер  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ , где основную роль играли реакции с электронными нейтрино, имеющие энергию  $E(\nu_e)$  около 40 МэВ.

Следующим этапом моделирования будет запуск всех типов нейтрино и антинейтрино и их ароматов в соответствии с предполагаемыми спектрами и потоками.

### ***5 Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей***

В рамках темы "Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей" получены важные результаты связанные с исследованием КЛУВЭ в эксперименте Telescope Array. Проведено сравнение наблюдаемой плотности мюонной компоненты ШАЛ в данных наземной решётки ТА с предсказаниями популярных адронных моделей QGSJET II-03 и QGSJET II-04. Обнаружен статистически значимый избыток событий по сравнению с ожиданиями, что подтверждает ранее имевшиеся указания на

этот эффект, до сих пор не получивший удовлетворительного теоретического объяснения [24]. С помощью детектора флуоресцентного излучения TALE, также чувствительного к черенковскому излучению от ШАЛ, вызванных космическими лучами более низких энергий, измерен спектр космических лучей в широком диапазоне энергий  $2 \times 10^{15}$  эВ -  $2 \times 10^{18}$  эВ. Одновременное наблюдение спектра на флуоресцентных детекторах TA и TALE, кривые чувствительности которых перекрываются на энергиях около  $10^{18}$  эВ, позволило впервые в мире построить единый спектр космических лучей в диапазоне  $2 \times 10^{15}$  эВ -  $10^{20}$  эВ по данным одного эксперимента [25]. Проведен совместный анализ событий ШАЛ детектированных одновременно флуоресцентными детекторами и наземной решеткой (гибридные события), установлено что данные при энергиях ШАЛ от 2 ЭэВ и выше с 95% достоверностью совместны с гипотезой о чисто протонном составе порождающих их космических лучей [26]. В ходе совместного анализа направлений прихода и энергии космических лучей выявлена анизотропия их спектра вблизи ранее обнаруженного экспериментом "горячего пятна", проявляющаяся на масштабах порядка 20 градусов [27]. Проведена проверка корреляции КЛУВЭ с галактиками со вспышкой звездообразования, указание на которую ранее получено экспериментом Pierre Auger. Установлено, что эксперимент Telescope Array не позволяет, в рамках предложенной Pierre Auger процедуры, доказать или опровергнуть данное указание [28].

### ***6 Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях $10^{15}$ - $10^{18}$ эВ***

В исследованиях по теме «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов ШАЛ и взаимодействий адронов при энергиях  $10^{15}$  –  $10^{18}$  эВ» получены следующие результаты.

В течение 2017 г. была продолжена отладка и юстировка программного пакета FANSY 2.0 QGSJ, разработанного для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий ( $10^{11}$  –  $10^{20}$  эВ), в соответствии с появляющимися новыми экспериментальными результатами, полученными при низких (например, NA61 SHINE, 158 ГэВ), а также при сверхвысоких (например, ATLAS и LHCb,  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ) энергиях.

FANSY 2.0 воспроизводит основные экспериментальные данные по pp взаимодействиям, полученные на ускорителях и коллайдере LHC в широком диапазоне энергий по генерации основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на

развитие ШАЛ, содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы).

В соответствии с планом на 2018 г., FANSY 2.0 моделирует взаимодействия мезонов (в первую очередь, пионов и каонов) с протонами.

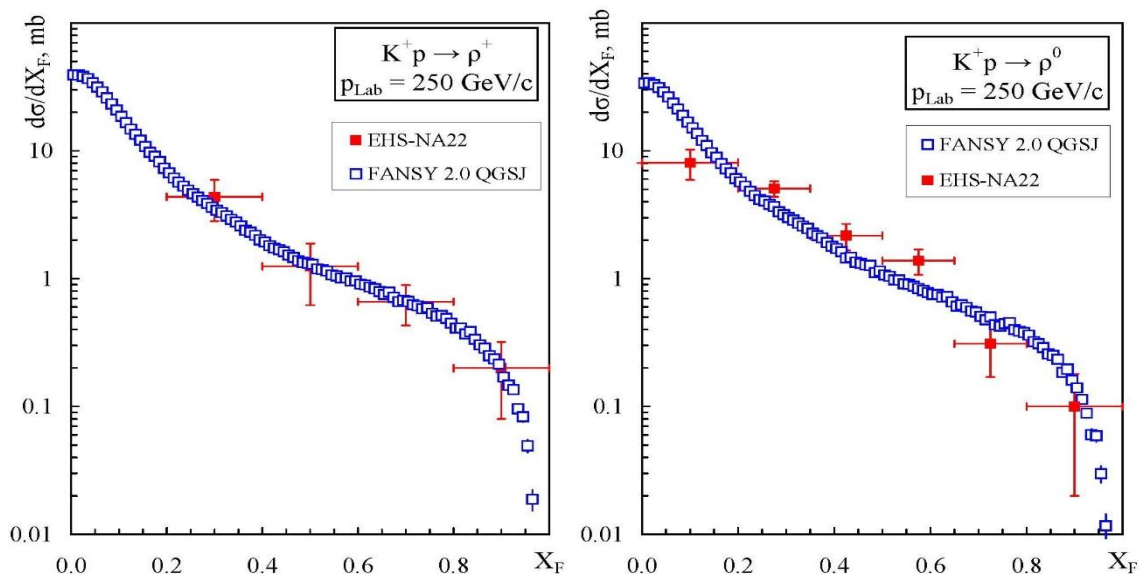


Рисунок 6.1.

На рисунке 6.1 показаны дифференциальные энергетические поперечные сечения  $d\sigma/dx_F$   $\rho^{+,0}$ -мезонов, родившихся в  $K^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте EHS-NA22 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{Lab} = 250$  ГэВ/с.

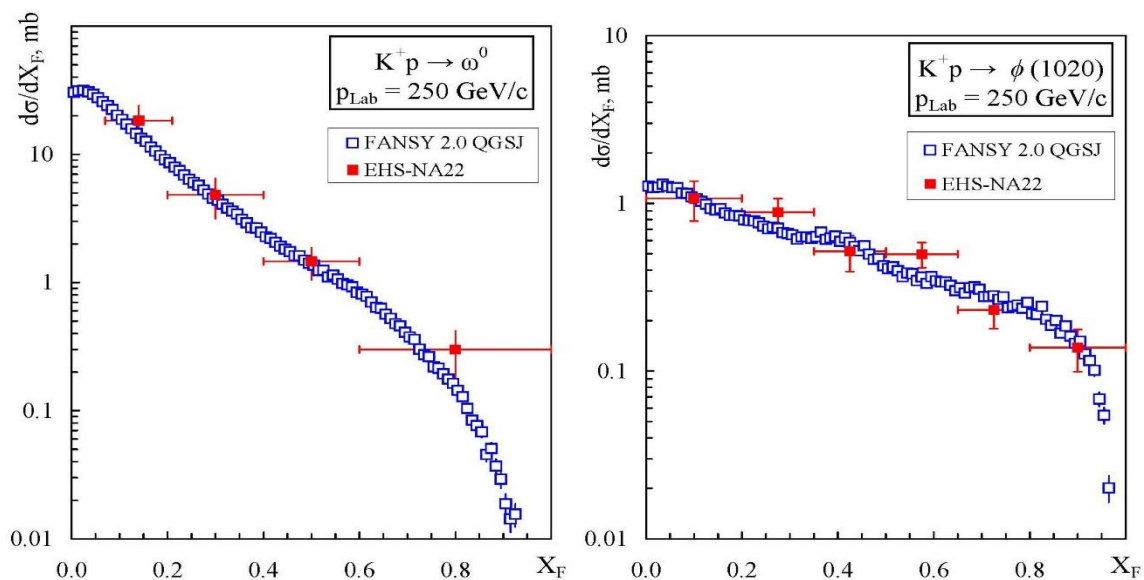


Рисунок 6.2.

На рисунке 6.2 показаны дифференциальные поперечные сечения  $d\sigma/dx_F$   $\omega^0$  и  $\phi$ -мезонов в  $K^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте EHS-NA22 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{\text{Lab}} = 250$  ГэВ/с.

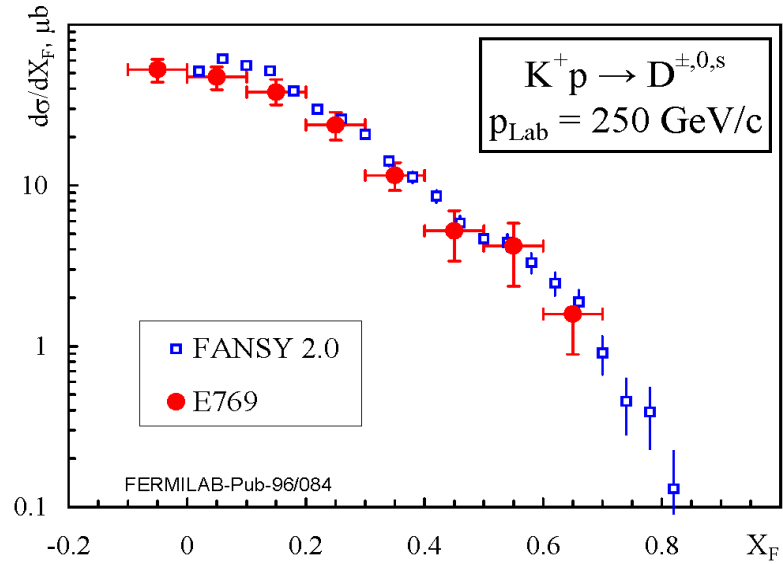


Рисунок 6.3.

На рисунке 6.3 показано дифференциальное поперечное сечение  $d\sigma/dx_F$  чармированных мезонов  $D^{\pm,0,s}$  в  $K^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте E769 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{\text{Lab}} = 250$  ГэВ/с.

Можно видеть хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных результатов, полученных с помощью FANSY 2.0, в  $K^+p$ -взаимодействиях.



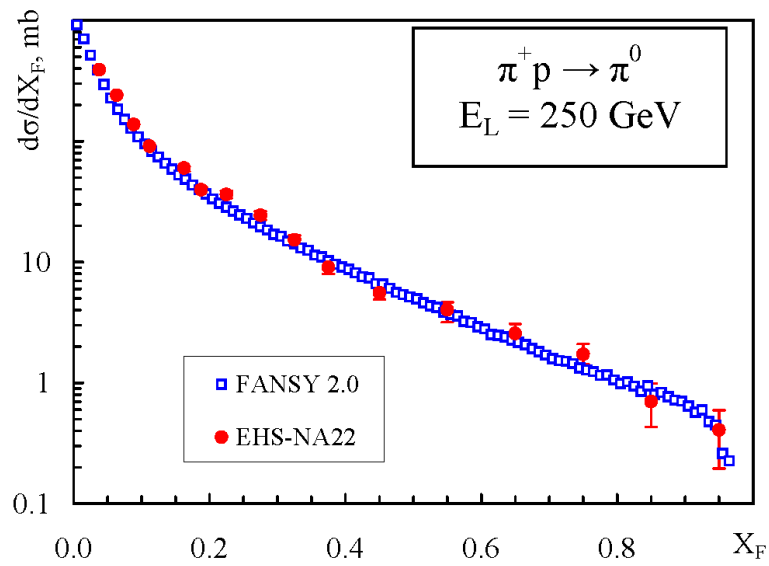


Рисунок 6.4.

На рисунке 6.4 показано дифференциальное энергетическое поперечное сечение  $d\sigma/dx_F$   $\pi^0$ -мезонов, родившихся в  $\pi^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте EHS-NA22 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{Lab} = 250$  ГэВ/с.

На рисунке 6.5 показано дифференциальное энергетическое поперечное сечение  $d\sigma/dx_F$   $\rho^0$ -мезонов, родившихся в  $\pi^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте EHS-NA22 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{Lab} = 250$  ГэВ/с.

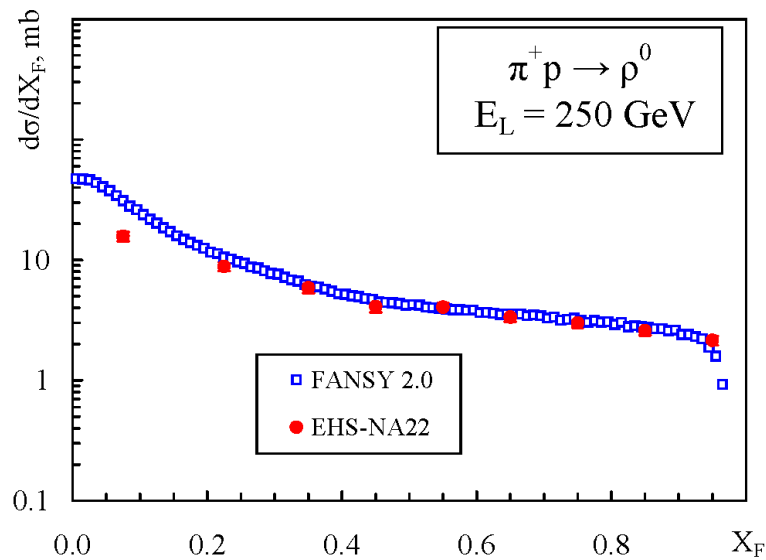


Рисунок 6.5.

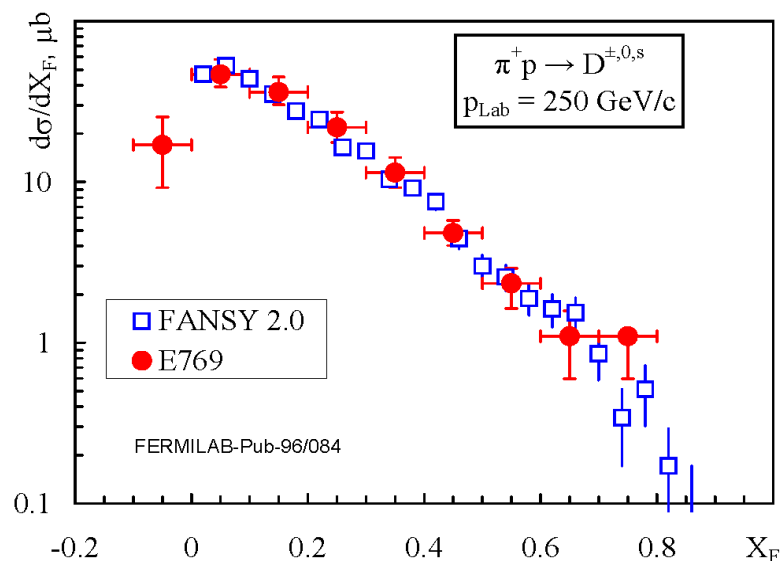


Рисунок 6.6.

На рисунке 6.6 показано дифференциальное поперечное сечение  $d\sigma/dx_F$  чармированных мезонов  $D^{\pm,0,s}$  в  $\pi^+p$  взаимодействиях, полученные в эксперименте E769 и рассчитанные по FANSY 2.0 при импульсе каона  $p_{Lab} = 250$  ГэВ/с.

Можно видеть хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных результатов, полученных с помощью FANSY 2.0, в  $\pi^+p$  взаимодействиях.

По результатам работы подготовлено две статьи, направленные в журнал *Eng. Phys. J. C.*, на которые уже получены отзывы рецензентов. В настоящее время готовятся ответы на рецензии.

Проведены расчеты образования т.н. «гало» – области потемнения в центре высокоэнергичных гамма-семейств (групп наиболее энергичных частиц в центральном стволе молодых ШАЛ) с наблюдаемыми энергиями выше 500 ТэВ. Результаты сравнения с экспериментальными данными показывают, что доля протонов и ядер гелия в спектре ПКИ во всей области энергий  $E_0 \sim 10 - 100$  ПэВ остается существенной (~15%) [1,2].

На основе версия FANSY 2.0 QGSCPG, разработанной на основе базовой модели FANSY 2.0 QGSJ и воспроизводящей компланарную генерацию энергически выделенных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях протонов первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями  $E_0 > 10^{16}$  эВ с ядрами атомов воздуха, исследовались возможные противоречия этого результата с данными LHC. Было показано, что согласование данных LHC и компланарности ЭВЧ в рамках

первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами (в плоскости компланарности) ЭВЧ очень маловероятно. Предложена новая концепция объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Предложена концепция эксперимента на LHC с использованием детектора CASTOR LHC для проверки новой гипотезы [3, 4].

### ***7 Исследование анизотропии и вариаций космических лучей 1011 – 1020 эВ***

В период 2018 года проводилась работа по обеспечению регулярного функционирования внешних удалённых наблюдательных пунктов. Двумя парами цифровых видеокамер, с расстояния 75 км и 0.5 км, в цветном и инфракрасном диапазонах круглосуточно просматривалось небо над БНО. Видеоматериал архивировался в виде фотографий отснятых каждой камерой. Ночной режим – одна фотография каждые 10 секунд, днём – каждую минуту. Цель – регистрация электромагнитного излучения атмосферы над установкой «Ковёр», в оптическом диапазоне, для более полного представления о процессах в атмосфере, влияющих на интенсивность вторичных космических лучей, регистрируемых на земле.

Для ночной грозы 24-25.07.2014, проведён анализ корреляции свечения ночного неба, возмущений геомагнитного поля и вариаций вторичных частиц космических лучей, регистрируемых установкой «Ковёр». Цель работы – изучение взаимодействия грозового заряда с зарядовыми возмущениями в ионосфере на средних широтах в период каскада магнитосферных суббурь. Обнаружены внезапные всплески положительного и отрицательного полей в тропосфере Земли, сопутствующие суббуревым активизациям. Эти возмущения формируются одновременно на расстоянии ~10-30 км друг от друга. Длительность переднего фронта положительного всплеска 30 секунд, отрицательного 2 минуты. Амплитуда разности потенциалов возмущений поля в тропосфере ~100 МВ.

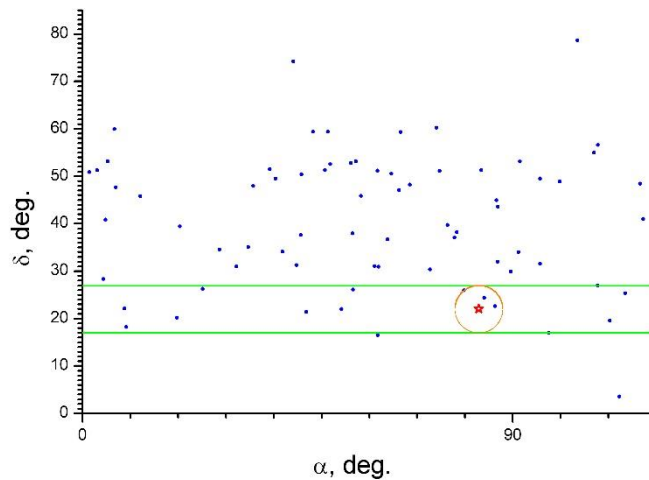


Рисунок 7.1 - Прошедшие отбор маломюонные события на участке неба, содержащем Крабовидную туманность (в экваториальных координатах). Указаны полоса склонений и круговая ячейка, включающие источник.

В рамках коллаборации Ковер-3 проводилась обработка экспериментального материала по поиску диффузного космического гамма-излучения сверхвысоких энергий и поиск сигнала от некоторых точечных источников. Для примера, на Рис. 1 представлены предварительные данные анализа бедных мюонами ливней от Крабовидной туманности. В ячейке источника обнаружено 3 кандидата на гамма-ливни при ожидаемом значении 0.74.

По результатам работ представлено 6 докладов на российских и Международных конференциях. Опубликовано 4 статьи и 2 препринта.

## ***8 Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ***

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2018 году (с 01.01 по 31.12) составило 8466 часов (96.6% календарного времени). На рисунке 8.1 приведено количество 15-минутных интервалов, в течение которых на БПСТ проводился набор информации, за каждые сутки 2018 года.

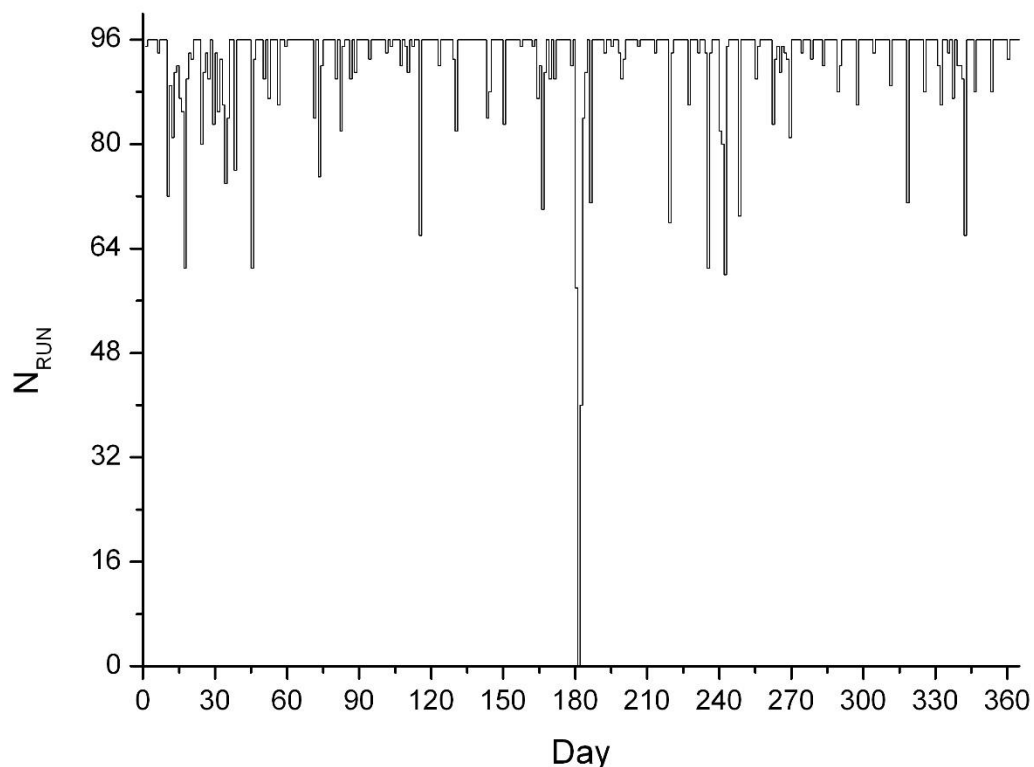


Рисунок 8.1 - Количество 15-минутных интервалов, в течение которых на БПСТ проводился набор информации, за каждые сутки 2018 года.

За 2018 было отремонтировано 103 сцинтилляционных счетчиков, настроены пороги дискриминаторов и коэффициенты усиления у 141 счетчика, заменены 2 ФЭУ. Было сделано контрольное измерение коэффициентов усиления ФЭУ (с подстройкой в случае необходимости) у 400 счетчиков. Измерение показало, с учетом периода полураспада радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ , который используется при настройке, высокую степень стабильности коэффициентов усиления. Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе ремонт годоскопа импульсных каналов (ГИК), годоскопа амплитудных каналов (ГАК) и ремонт системы относительного времени.

Продолжалась работа по созданию нового годоскопа импульсных каналов (ГИК) для БПСТ. Разработаны два варианта вывода информации с ГИК, с различными схемами реализации в ПЛИС. В первом варианте производится последовательный опрос каналов ГИК с учетом сработавших каналов программным способом. Во втором

варианте аппаратным способом выводится информация об адресах сработавших каналов, что ускоряет сбор данных.

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2018 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7630 часов, было зарегистрировано 42 мюонных нейтрино из нижней полусферы.

Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года по 31.12.2018 составляет 283995 часа (32.4 года). Всего за это время было зарегистрировано 1700 нейтрино. Распределение этих событий в экваториальных координатах приведено на рисунке 8.2.

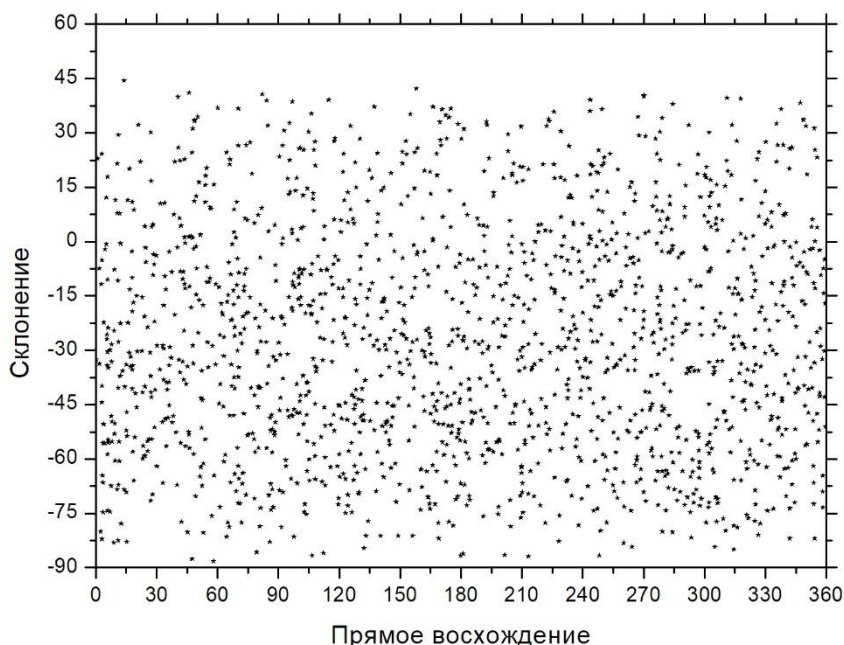


Рисунок 8.2 - Распределение всех зарегистрированных на БПСТ мюонных нейтрино из нижней полусферы в экваториальных координатах.

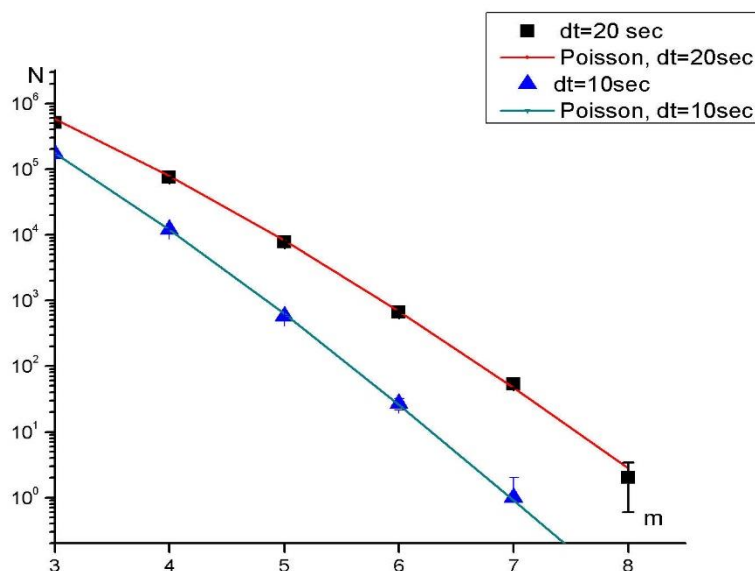
По информации БПСТ за 2018 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, чистое время набора по этой задаче составило 336.9 суток – 92.3 % от календарного времени за период с 01 января 2018 по 31 декабря 2018 года.

БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации

антинейтрино в реакции обратного бета-распада. Т.к. средняя энергия позитрона  $\approx 15$  МэВ, то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10 – 20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска кластера одиночных срабатываний счетчиков на установке в скользящем окне длительностью 20 секунд. Т.к. используется скользящее от события к событию окно, то при такой обработке всегда имеется хотя бы одно событие в кластере, и сгусток событий, вызванный нейтринной вспышкой, гарантированно не будет пропущен.

Проведена обработка всей набранной в 2018 году информации, обработано 489007402 события, из них отобрано 682582 одиночных события, из которых удовлетворило критериям отбора 597934 события. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2018 года не было обнаружено.

На рисунке 8.3 показано распределение фоновых событий по множественности в скользящем временном окне, равном 20 секундам и 10 секундам (данные за 2001 – 2018 годы, чистое время 15.5 лет).



Рисунке 8.3 - Распределение кластеров по множественности m, 2001- 2018 год.

Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2018 года составляет 33.02 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90% доверительном уровне по данным БПСТ составляет  $0.070 \text{ год}^{-1}$ .

Одним из источников фона при поиске нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд является образование кластеров из одиночных событий на БПСТ после каскадов. В 2018 году проводилось изучение этого источника фоновых событий по информации за 2011 - 2018 годы. Для событий на внутренних плоскостях БПСТ был проведен поиск одиночных срабатываний в течение 2-х секунд после каскада. В данном случае каскадом считалось любое событие, в котором есть сработавший логарифмический преобразователь (ЛП, порог 500 МэВ) на внутренней горизонтальной плоскости установки. Для каждой множественности кластеров получены распределения по числу одиночных событий в кластере, которые появились в течение двух секунд после каскада. За исключением уникального события (31.10.2017) с кратностью 9, из которых восемь одиночных появились в течение 1.3554 секунды после ядерного каскада с энергией 12.3 ТэВ, не было обнаружено кластеров кратности выше 5-и, все одиночные срабатывания в которых были бы вызваны предшествующим каскадом.

В 2018 году запущен новый вариант программы поиска нейтринных вспышек на БПСТ в режиме квазиреального времени (в котором обработка набранной за 15-минутный интервал информации проводится сразу после её записи на файл-сервер). Для исключения ложных алертов, кроме совпадения кластеров в независимых детекторах D1 и D2 БПСТ, дополнительно анализируются предшествующие события (в интервале 4-х секунд) с большим энерговыделением в сработавших одиночных счетчиках. Такой анализ позволяет выявить возможную генетическую связь одиночных событий с предшествующим каскадом.

С использованием метода нейтронно-активационного анализа измерен поток быстрых нейтронов на внутренних плоскостях БПСТ. Нестабильный изотоп  $^{12}\text{В}$  образуется в органическом сцинтилляторе в  $(n, p)$ -реакции на ядрах углерода. На БПСТ событие рождения и последующего распада изотопа  $^{12}\text{В}$  представляет собой два последовательных одиночных сигнала из одного и того же счетчика, разделенных временным промежутком  $\Delta t$ . По распределению временных интервалов методом аппроксимации оценивается наработка  $^{12}\text{В}$ . По результатам обработки информации

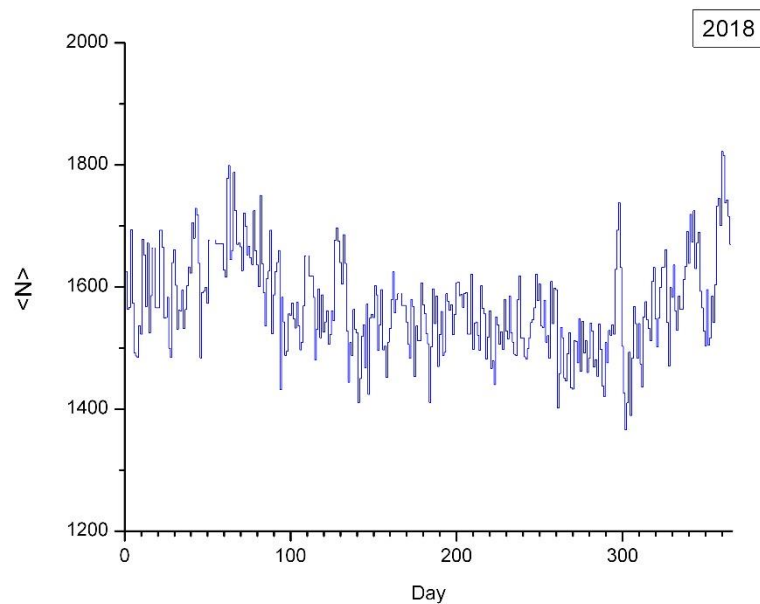


БПСТ за 2001 – 2018 годы для нейтронов с пороговой энергией 28.6 МэВ получено значение потока нейтронов на внутренних плоскостях телескопа:  $(2.5 \pm 0.5) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . С использованием полученного значения потока сделана оценка вклада упругого рассеяния нейтронов на протонах сцинтиллятора в общий фон одиночных срабатываний счетчиков внутренних плоскостей БПСТ:  $1.2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , что составляет 6% от темпа одиночных срабатываний внутренних плоскостей БПСТ.

5. Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке “Ковер-2” по всем физическим задачам. После подтопления МД в течение 3-х месяцев проводились восстановительные работы три месяца, после чего был восстановлен набор информации, и продолжились наладочные работы.

Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Было отремонтировано и настроено 60 логарифмических LC-преобразователей центральной части установки и 6 RC-преобразователей мюонного детектора. Были отремонтировано 10 детекторов (7 жидкостных и 3 пластических), причиной которых явилось выхода из строя делителей и ФЭУ-49 (заменены 5 ФЭУ). Был проведен ремонт блока формирования триггерного сигнала. Был отремонтирован высоковольтный источник, из-за поломки которого было потеряно 10 суток набора информации.

Чистое время набора информации составляет 94 % календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ и 97% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ). На рисунке 8.4 приводятся среднесуточные значения числа триггеров М1, приведенные к 20 минутам набора, за каждые сутки 2018 года.



Рисунке 8.4 - Среднесуточные значения числа ливневых триггеров М1 установки “Ковер-2”, приведенных к 20 минутам набора, за 2018 год.

Регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ происходит по триггеру М1, который вырабатывается при совпадении сигналов с 4-х ВП, установленных на расстояниях 30 м от Ковра, с сигналом от Ковра с порогом 150 р.ч. Частота этих событий  $1.2 \text{ сек}^{-1}$ , пороговая энергия для этих ливней  $\approx 5 \times 10^{13} \text{ эВ}$ . В 2018 году это же триггер используется для записи информации в МД, что позволяет увеличить эффективность регистрации ливней от первичных гамма-квантов. Для этого были внесены существенные изменения в триггерный блок МД. Набор информации с новым триггером МД идет с 97 дня 2018 года, чистое время набора – 204 суток. Предварительные результаты анализа новых данных – распределение событий в плоскости ( $n_{\mu} - N_{\text{г.р.}}$ ) – приведены на рис. 24. Здесь  $n_{\mu}$  – условное число мюонов в МД (именно, энерговыделение в МД единицах “релятивистская частица”),  $N_{\text{г.р.}}$  – мощность ливня в тех же единицах.

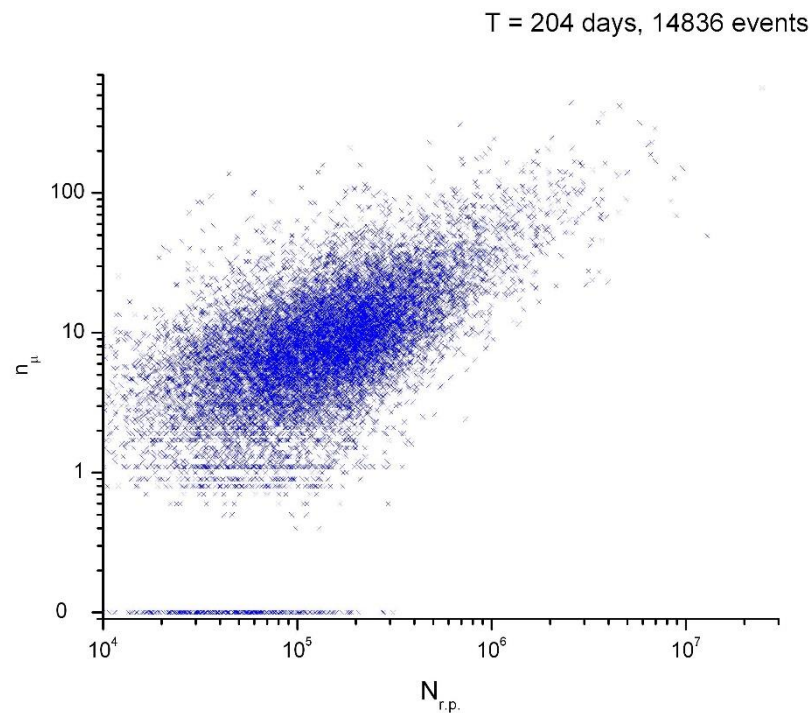


Рисунок 8.5 - Зависимость  $(n_{\mu} - N_{r.p.})$  для ливней, отобранных по триггеру M1, за 204 суток 2018 года.

### ***9 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO***

В 2018 г. были получены новые результаты по изучению космических лучей сверхвысоких энергий разработанным в ИЯИ РАН методом (проект PRISMA). С помощью специализированных сцинтилляционных детекторов (эн-детекторы) измеряется как электронная, так и ранее не изучавшаяся компонента широких атмосферных ливней - тепловые нейтроны. Проводилось полномасштабное моделирование экспериментов, как уже проведенных на двух прототипах, расположенных на существенно различных уровнях наблюдения: на уровне моря (установка PRISMA-32) и на высоте 4300 м над уровнем моря (установка PRISMA-YBJ), так и первой очереди будущего эксперимента PRISMA-LHAASO из 64 эн-детекторов (4400 м над ур. моря, старое название - PRISMA-YBJ). Наклон полученного на прототипах степенного спектра по числу тепловых нейтронов в ШАЛ совпадает с наклоном -1.9, полученным ранее в эксперименте KASCADE для спектра по числу

адронов. Восстановленный из него энергетический спектр космических лучей в области выше 1 ПэВ, имеет степенной вид с интегральным показателем 1.70-1.75, что хорошо согласуется с прямыми измерениями при энергиях ниже 1 ПэВ.

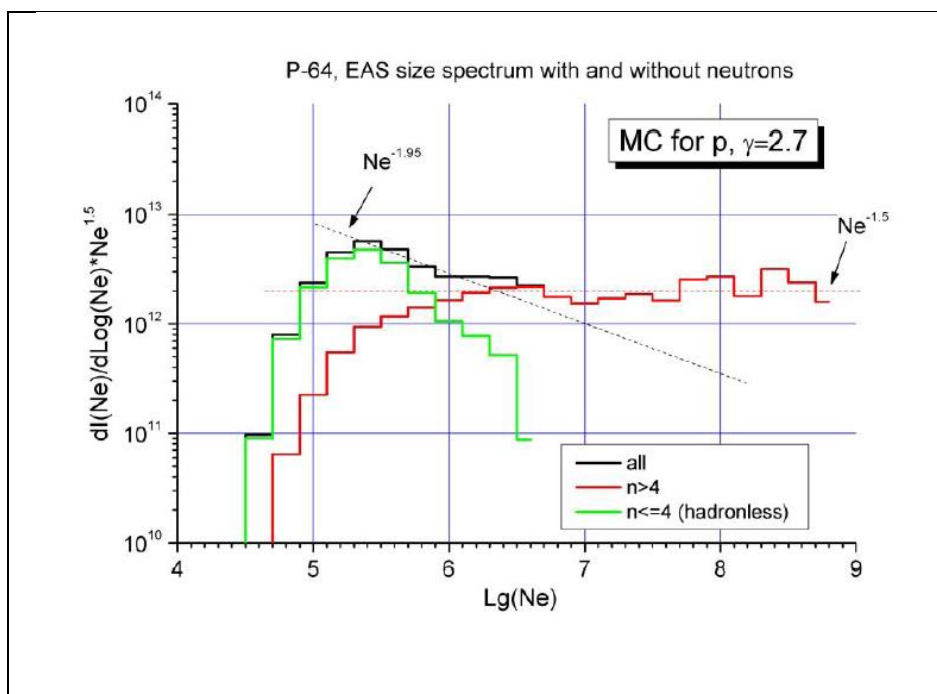


Рисунок 9.1 - Ожидаемое распределение по мощности ШАЛ для эксперимента PRISMA-LHAASO.

Результат детального моделирования эксперимента PRISMA-LHAASO по ожидаемому спектру мощностей ШАЛ для чисто степенного первичного спектра, показан на рисунке 9.1. Использование нейтронной компоненты ШАЛ позволит отбраковать бесствольные (безадронные) ливни и, тем самым, избежать вызываемого ими искажения измеряемого спектра.

Разрабатываемый нами новый метод измерения химического состава космических лучей по соотношению между электронной и нейтронной компонентами ШАЛ ( $e/n$ ) при энергиях выше 1 ПэВ был применен на практике к экспериментальным данным, полученным ранее на высокогорном прототипе PRISMA-YBJ. Полученный результат (см. рисунок 9.2) свидетельствует о легком химическом составе космических лучей в указанной области энергий и хорошо согласуется с мировыми данными, полученными в прямых измерениях вне атмосферы при энергиях ниже 1 ПэВ. Параметр  $Y$  характеризует наклон экспоненциального распределения по  $e/n$  отношению

в индивидуальных ливнях. Как видно из рисунка, полученный средний атомный номер первичных частиц лежит между гелием и азотом:  $\langle A \rangle \approx 5$ .

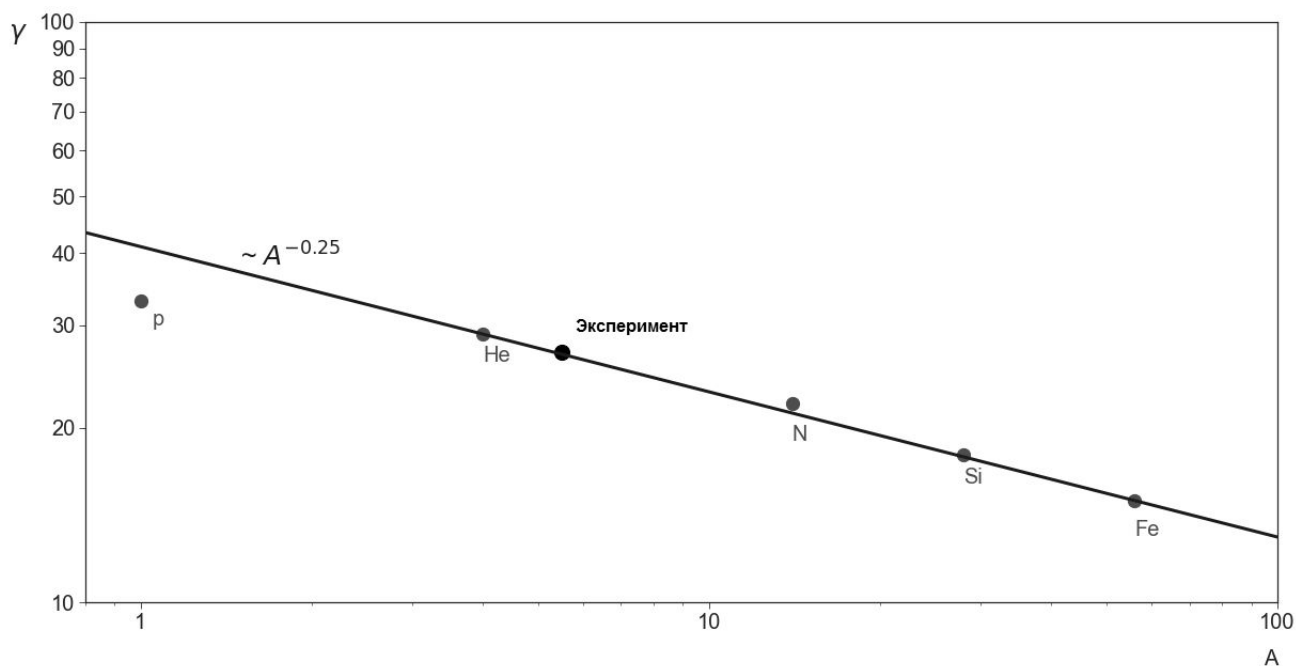


Рисунок 9.2 - Результаты моделирования и экспериментальные данные.

Начато создание полномасштабной установки в рамках международного проекта LHAASO. В содружестве с китайскими коллегами собран, настроен и включен в тестовый режим первый кластер из 16 эн-детекторов на основе нового недорогого борного сцинтилляционного светосостава (рисунок 9.3). В результате тестирования выявлен ряд недостатков системы сбора данных, которые были устранены, и начат новый тестовый сеанс. Собраны и протестированы в КНР еще 48 эн-детекторов, которые ждут отправки на место проведения эксперимента.



Рисунок 9.3 - Работающий высокогорный тестовый кластер PRISMA-16 в Тибетском университете (г. Лхаса, 3700 м над уровнем моря).

Получены новые интересные результаты по программе изучения вариаций природных потоков тепловых нейтронов с помощью эн-детекторов в различных геофизических условиях. В частности, в 2018 г. проведен анализ вариационных данных установки PRISMA-YBJ и обнаружен отклик эн-детекторов на землетрясения с эпицентром на расстояниях до 600 км. На рисунке 9.4. Показан отклик эн-детекторов на Непальское землетрясение 25.04.2015 и его афгешоки.

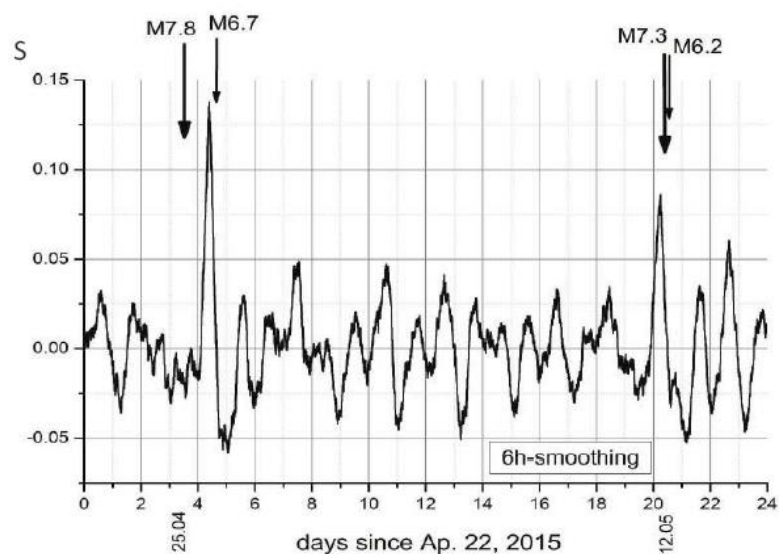


Рисунок 9.4 - Отклик эн-детекторов на расстоянии ~600 км от эпицентра Непальского землетрясения.

В 2019 г. ожидается развертывание и начало работы первой очереди установки PRISMA-LHAASO на г. Хайци на высоте 4400 м над уровнем моря. Будут продолжены моделирование эксперимента и анализ данных по вариациям природных потоков тепловых нейтронов в различных геофизических условиях. Планируется создание вариационной эн-установки в сейсмоактивном районе на Камчатке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### ***1 Задача «Глубоководное детектирование мюонов и нейтрино на оз. Байкал».***

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В апреле 2018 г. на оз. Байкал введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных третий кластер Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. В результате нейтринный телескоп из трех кластеров достиг объема 0,15 км<sup>3</sup> и стал самым крупным глубоководным нейтринным телескопом в Северном полушарии, Baikal-GVD является нейтринным телескопом мультимегатонного масштаба, который способен вести исследование потока астрофизических нейтрино на уровне чувствительности  $\sim 0.5-0,6$  события в год. Способность установки регистрировать астрофизические нейтрино высоких энергий экспериментально доказана.

В ходе эксплуатации установки в течение 2018 г. выполнена калибровка измерительных систем телескопа, осуществляется непрерывный мониторинг фоновых условий среды, непрерывное измерение координат оптических детекторов. По мере накопления и первичного анализа данных формируется банк экспериментальных событий для последующего физического анализа, и, в частности, в задаче выделения мюонных событий от нейтрино астрофизической природы. Разработаны программы численного моделирования событий от нейтрино астрофизической природы и событий от фоновых потоков атмосферных мюонов и нейтрино. Все программы адаптированы для использования в единой среде обработки и моделирования BARS.

Успешно проведены все мероприятия для обеспечения установки 4 и 5 кластеров в течение февраля-апреля 2019 года и заложены твердые научные, производственные, материально-технические основы для выполнения планов работ на последующие годы и поддержания в рабочем режиме создаваемого телескопа Baikal-GVD.

### ***2 Задача «Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории».***

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Анализ по поиску возможных временных модуляций и сезонных вариаций скорости захвата нейтрино на галлии, примененный для 270 солнечных измерений на



ГГНТ, за период наблюдений 28.5 лет, не выявил в данных каких-либо статистически значимых временных вариаций. Данные хорошо согласуются с предположением о постоянстве потока солнечных нейтрино.

Величины скорости захвата, полученные из объединенного анализа данных измерений в двух зонах, согласуются в пределах статистических ошибок.

Для повышения чувствительности ГГНТ в 2018 году поставлено около 6000 кг высокой чистоты галлия марки ГЛ-99,9999.

Разработан и изготовлен Лабораторный контейнер для размещения и проведения работ с высокоинтенсивным источником.

### ***3 Задача «Проблема геофизических нейтрино».***

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Разработана модель фона детектора, которая позволяет надежно выделить сигнал от спектра  $^{14}\text{C}$ . На рисунке показано измерение фона за 322.9 часа и смоделированный фон от внешнего и внутреннего излучения от источников естественной радиоактивности.

Моделирование фона улучшается за счет введение в программу расчета учета светособирания фотонов в объеме детектора.

Разработан метод измерения собственной радиоактивности сцинтиллятора по коррелированным распадам  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  от цепочки тория с характерным временем между событиями до 1000 нс и  $^{214}\text{Bi}$ - $^{214}\text{Po}$  от цепочки урана во временном окне до 15 мкс.

### ***4 Задача «Поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд в Галактике на детекторах АНС и LVD».***

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В рамках Госзадания на 2019 год планируется:

1) проведение работ по поддержанию установок LVD и АСД в работоспособном состоянии для обеспечения научных программ экспериментов;

2) продолжение работ по непрерывной регистрации и обработке информации данных по поиску всех типов нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд на детекторах АСД и LVD;

3) с помощью детектора LVD изучение фона, создаваемого мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью;

4) изучение корреляций радоновых данных, измеренных детектором LVD и тектонической активности в области центральной Италии.

#### ***5 Задача «Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей».***

Обнаружен статистически значимый избыток событий по сравнению с ожиданиями, что подтверждает раннее имевшиеся указания на этот эффект, до сих пор не получивший удовлетворительного теоретического объяснения. С помощью детектора флуоресцентного излучения TALE, также чувствительного к черенковскому излучению от ШАЛ, вызванных космическими лучами более низких энергий, измерен спектр космических лучей в широком диапазоне энергий  $2 \times 10^{15}$  эВ -  $2 \times 10^{18}$  эВ. Одновременное наблюдение спектра на флуоресцентных детекторах TA и TALE, кривые чувствительности которых перекрываются на энергиях около  $10^{18}$  эВ, позволило впервые в мире построить единый спектр космических лучей в диапазоне  $2 \times 10^{15}$  эВ -  $10^{20}$  эВ по данным одного эксперимента.

#### ***6 Задача «Высокогорные исследования астро- и ядернофизического аспектов шал и взаимодействий адронов при энергиях $10^{15}$ - $10^{18}$ Эв»***

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0 для моделирования взаимодействий адронов в широком интервале энергий ( $10^{11}$  –  $10^{20}$  эВ), воспроизводящий основные характеристики взаимодействий мезон-протон, генерацию основных типов вторичных частиц, оказывающих влияние на развитие ШАЛ и содержащих u,d,s,c кварки (заряженные и нейтральные пионы, каоны, нуклоны и барионы, чармированные частицы, мезонные и барионные резонансы), а также экспериментальные данные при низких энергиях ускорителей и сверхвысоких энергиях ЛНС.

Результаты сравнения данных ЛНС и моделирования компланарности энергетически выделенных частиц требуют введения новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Предложена концепция эксперимента на ЛНС для проверки явления компланарности энергетически выделенных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

Проведены расчеты образования т.н. гало – области потемнения в центральном стволе молодых ШАЛ. Сравнение результатов расчетов образования гало в  $\gamma$ -семействах с экспериментальными данными показывает, что доля протонов и ядер гелия в спектре ПКИ при энергиях  $E_0 \sim 10 - 100$  ПэВ остается существенной ( $\sim 15\%$ ) на всем протяжении энергетического интервала.

**7 Задача «Исследование анизотропии и вариаций космических лучей  $10^{11} - 10^{20}$  эВ».**

План работ на 2018 год выполнен полностью.

Было обеспечено регулярное функционирование внешних удалённых наблюдательных пунктов, материал архивирован в виде фотографий отснятых каждой камерой. Для ночной грозы 24-25.07.2014, проведён анализ корреляции свечения ночного неба, возмущений геомагнитного поля и вариаций вторичных частиц космических лучей регистрируемых установкой «Ковёр» и обнаружены внезапные всплески положительного и отрицательного полей в тропосфере Земли сопутствующие суббуревым активизациям. В рамках коллаборации Ковер-3 получены предварительные данные анализа бедных мюонами ливней от Крабовидной туманности. В ячейке источника обнаружено 3 кандидата на гамма-ливни при ожидаемом значении 0.74.

**8 Задача «Экспериментальное исследование потоков частиц природного происхождения на комплексе установок БПСТ».**

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В течение 2018 года на установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, и проводились работы по модернизации установок. Проводились восстановительные работы после стихийного бедствия. Проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установках, и мониторинг потоков частиц космического излучения. Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков, получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике.

**9 Задача «Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного проекта LHAASO»**

План работ на 2018 год выполнен полностью.

В результате работы были протестированы и отлажены все узлы создаваемой установки PRISMA-LHAASO. С учетом выявленных недостатков в систему сбора

данных и он-лайн программу внесены изменения. По полученным ранее на пилотной установке PRISMA-YBJ экспериментальным данным проведено тестирование разрабатываемого нами нового метода измерения химического состава космических лучей. Получен предварительный результат, согласующийся с легким составом и с мировыми данными при более низких энергиях. В ходе непрерывного мониторингования природного потока тепловых нейтронов с помощью эн-детектов, обнаружен отклик этого потока на сильные землетрясения в радиусе 600 км.

## ПУБЛИКАЦИИ

### 1. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ГЛУБОКОВОДНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЮОНОВ И НЕЙТРИНО НА ОЗ. БАЙКАЛ»

1. A.D. Avrorin et al., “Search for High-energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD Neutrino Telescope”, Oct 25, 2018, 4pp, Pis'ma v ZhETF vol 108, issue 12, page 803; arXiv:1810.10966
2. A.D. Avrorin et al., “Baikal-GVD: status and prospects”, EPJ Web Conf. 191 (2018) 01006; arXiv:1808.10353.
3. A.D. Avrorin et al., “Baikal-GVD: first results and prospects”, 7th Roma International Conference on AstroParticles Physics, Rome, Italy, 4-7 September, 2018, 6pp, <https://saga.edpsciences.org/article/epjconf/epjconf182751#tab-submission-documents>.
4. Г.В. Домогацкий, “Gigaton Volume Detector (GVD) in Lake Baikal: status of the project”, NEUTEL2017 (2018) 063.
5. Vladimir Aynutdinov et al., “Status of the Baikal-GVD experiment - 2017”, 35th ICRC-2017 12-20 июля 2017, Вехсо, Busan, S.Korea, PoS ICRC2017 (2018) 1034.
6. Bair Shaybonov et al., “Data management and processing system for the Baikal-GVD telescope”, PoS ICRC2017 (2018) 1046.
7. Kirill Golubkov et al., “Calibration and monitoring units of the Baikal-GVD neutrino telescope”, PoS ICRC2017 (2018) 1032.
8. A.D. Avrorin et al. “Baikal-GVD: Time Calibrations in 2016”, PoS ICRC2017 (2018) 1036.
9. A.D. Avrorin et al., “Hydroacoustic Positioning System for the Baikal-GVD”, PoS ICRC2017 (2018) 1033.
10. A.D. Avrorin et al., “Cascades in GVD”, PoS ICRC2017 (2018) 962.

## **2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП (ГГНТ) БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ»**

11. V. N. Gavrin, V. V. Gorbachev, T. V. Ibragimova, A. V. Kalikhov, A. A. Shikhin, V. E. Yants. Registration system for  $^{71}\text{Ge}$  rare decays in proportional counters for BEST experiment. *Physics of Particles and Nuclei*. (2018), Volume 49, Issue 1, pp 39–41.
12. Vladislav Barinov, Bruce Cleveland, Vladimir Gavrin, Dmitry Gorbunov, Tatiana Ibragimova. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly. *Phys. Rev. D* 97, 073001 (2018)
13. A.A. Shikhin, V.N. Gavrin, V.V. Gorbachev, N.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, V.V. Kazalov, Counting Characteristics of the Registration System for the Baksan Experiment on Sterile Transitions, *Phys.Part.Nucl.* 49 (2018) No.4, 799-803.

## **3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ПРОБЛЕМА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО»**

14. Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, А. С. Курлович, Б. К. Лубсандоржиев, А. К. Межох, В. П. Моргалюк, В. В. Синева, Гео-нейтрино и тепловой поток Земли, *ЭЧАЯ*, 49, вып. 4, с. 1191, 2018.
15. W.H. Trzaska, L. Bezrukov, T. Enqvist, J. Joutsenvaara, P. Kuusiniemi, K. Loo, B. Lubsandorzhev, V. Sinev, M. Slupecki, Possibilities for Underground Physics in the Pyhasalmi mine, arXiv:1810.00909 [physics.ins-det].
16. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН для исследования природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики, *Ядерная физика*, т. 80, № 3, с. 230, 2017.
17. L.B. Bezrukov, A.S. Kurlovich, B.K. Lubsandorzhev et al., On Geoneutrinos, *EPJ Web of Conferences* 125, 02004 (2016).
18. T. Enqvist, I. Barabanov, L. Bezrukov, et al. Towards  $^{14}\text{C}$ -free liquid scintillator, *J. Phys. Conf. Ser.* 888 (2017) no.1, 012098.

19. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, А.В. Вересникова и др., Измерение содержания  $^{14}\text{C}$  в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, Ядерная физика, т. 80, № 6, с., 2017.

#### **4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ПОИСКИ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ КОЛЛАПСОВ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ НА ДЕТЕКТОРАХ АНС И LVD»**

20. О.Г. Ряжская, Д.К. Надёжин, Н.Ю. Агафонова "Три десятилетия исследований Сверхновой SN 1987A", ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2018, том 88, № 4, с. 361–367.

21. А.Г. Антоненко, В.П. Борщевский, Р.И. Еникеев, О.В. Очкас, О.Г. Ряжская, Л.В. Чернышов, А.П. Ярош, Н.А. Ярош «Сорок лет Артемовскому сцинтилляционному детектору нейтрино» Ядерная Физика 2018 т. 81 №1, 78-84.

22. Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев «Эксперимент LVD: 25 лет работы», Ядерная Физика 2018 т. 81 №1, 85-94.

23. О.Г. Ряжская «Проблемы нейтринного излучения от SN1987A. Тридцать лет спустя», Ядерная Физика 2018 т. 81 №1, 98-105.

#### **5. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ФИЗИКЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ»**

24. Abbasi R.U. et al. Study of muons from ultrahigh energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment // Phys.Rev. 2018. Vol. D98. P. 022002.

25. Abbasi R.U. et al. The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in monocular mode // Astrophys.J. 2018. Vol. 865. P. 74.

26. Abbasi R.U. et al. Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode // Astrophys.J. 2018. Vol. 858. P. 76.

27. Abbasi R.U. et al. Evidence of Intermediate-Scale Energy Spectrum Anisotropy of Cosmic Rays  $E \geq 10^{19.2}$  eV with the Telescope Array Surface Detector // Astrophys.J. 2018. Vol. 862. P. 91.

28. Abbasi R.U. et al. Testing a Reported Correlation between Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays and a Flux Pattern from nearby Starburst Galaxies using Telescope Array Data // *Astrophys.J.* 2018. Vol. 867. P. L27.

**6. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ВЫСОКОГОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРО- И ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКОГО АСПЕКТОВ ШАЛ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АДРОНОВ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 1015 - 1018 ЭВ»**

29. R.A. Mukhamedshin, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, and S. B. Shaulov. Gamma-ray families with halos observed by X-ray emulsion chamber in EAS and the estimate of the p+He fraction in primary cosmic rays at  $E_0 = 1 - 100$  PeV. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* (2018), Vol. 45, No. 1, pp. 380-384.

30. R.A.Mukhamedshin, V.S.Puchkov, S.E.Pyatovsky, S.B.Shaulov. Analysis of gamma-ray families with halos and estimation of mass composition of primary cosmic radiation at energies 1-100 PeV. *AstroParticle Physics* (2018).

**Доклады на конференциях:**

A.Borisov, ... R. Mukhamedshin et al. Investigation of abnormal absorption of cosmic-ray hadrons in lead calorimeters (oral) *Proc. ISVHECRI 2018, 21-25 May 2018 (Nagoya)*

R.A.Mukhamedshin. Do LHC data contradict superhigh-energy cosmic-ray coplanarity of most energetic particles? (oral) *Proc. 26th E+CRS and 35th RCRC, 6-10 July 2018 (Barnaul) ID 155*

**7. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ И ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ» 1011 – 1020 ЭВ**

31. А.С. Лидванский, Они были первыми (к 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории), *Физика Элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ)*, 2018, т. 49, №. 4, стр. 868-880.

32. Джаппуев Д.Д., Петков В.Б., Лидванский А.С., Волченко В.И., Волченко Г.В., Горбачева Е.А., Дзапарова И.М., Куджаев А.У., Клименко Н.Ф., Куреня А.Н., Михайлова О.И., Птицына К.В., Хаджиев М.М., Янин А.Ф. Эксперимент «Ковер-3»: поиск диффузного гамма- излучения с энергией свыше 100 ТэВ, *Физика Элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ)*, 2018, т. 49, №. 4, стр. 1064-1073.



33. Джаппуев Д.Д., Волченко В.И., Волченко Г.В., Горбачева Е.А., Дзапарова И.М., Куджаев А.У., Клименко Н.Ф., Куреня А.Н., Лидванский А.С., Михайлова О.И., Петков В.Б., Птицына К.В., Хаджиев М.М., Янин А.Ф., Комплексная ливневая установка Ковер-3 Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, ЭЧАЯ, 2018, т. 49, вып. 4, стр. 1093-1102.

34. А.С. Лидванский, Г.Т. Зацепин и начало гамма-астрономии, УФН, 188 1019–1024 (2018), DOI: 10.3367/UFN.2017.05.038184.

**Доклады на конференциях:**

A.S. Lidvansky, Baksan Air Shower Array: New Prospects for Old Facility, 20th Intern Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2018), Nagoya, Japan, May 21-23, 2018.

А.С. Лидванский, О двух вспышках гамма-излучения ультравысоких энергий зарегистрированных установкой Ковер БНО, Конференция «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах», Крымская астрофизическая обсерватория, 3-7 июня 2018 г.

M.N. Khaerdinov, N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Remote observation of a continuous glow of the night-time atmosphere during thunderstorms and analysis of the high-altitude electrical field dynamics according to the data on cosmic ray variations, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha, 6-10 July, 2018.

N.S. Khaerdinov, M.N. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, Continuous glow of the night atmosphere during thunderstorms and the dynamics of its electrical state from the data of cosmic ray variations, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha, 6-10 July, 2018.

V.B. Petkov, D.D. Dzappuev, A.S. Lidvansky, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin, Carpet-2 limits on the isotropic diffuse gamma-ray flux between 100 TeV and 1 PeV, 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha, 6-10 July, 2018.

A.S. Lidvansky, Baksan Air Shower Array: Review of Results and Prospects for the Future, 8th Workshop on Air Shower Detection at High Altitude (совещание коллаборации LHAASO), (ИЯИ РАН) Сентябрь, 17-18, 2018, Moscow

**8. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ ПРИРОДНОГО  
ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВОК БПСТ**

35. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, Р.В. Новосельцева, Ю.Ф. Новосельцев, В.Б. Петков, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, А.Ф. Янин. Измерение потока нейтронов под землей на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе ИЯИ РАН. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т.49, вып. 1, стр. 168 - 175, 2018
36. И.М. Дзапарова, В.И. Волченко, А.М. Гангапшев, Е.А. Горбачева, А.Н. Куреня, В.Б. Петков, А.В. Сергеев, А.Ф. Янин. Сцинтилляционный детектор с фотоприемником на основе матриц из кремниевых фотоумножителей. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т.49, вып. 1, стр. 38 - 41, 2018.
37. В.Б. Петков. Изотропный поток нейтрино от взрывов сверхновых звезд во Вселенной. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т.49, вып. 1, стр. 197 - 203, 2018.
38. В.Б. Петков, Р.В. Новосельцева, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, А.Н. Куреня, Ю.Ф. Новосельцев, П.С. Стриганов, А.Ф. Янин. Поиск на БПСТ электронных нейтрино от гравитационно-волновых событий. Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 7, с. 418 – 421, 2018.
39. В.Б. Петков. Космомикрофизика. Эксперименты в Баксанской нейтринной обсерватории. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1112 - 1123, 2018.
40. И.М. Дзапарова, А.Ф. Янин, Е.А. Горбачева, А.Н. Куреня, В.Б. Петков, А.В. Сергеев. Опытный образец сцинтилляционного детектора с фотоприемниками на основе матриц из кремниевых фотоумножителей. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1326 - 1333, 2018.
41. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, Е.А. Горбачева, А.Н. Куреня, В.Б. Петков, А.В.Сергеев. Разработка сцинтилляционного трекового детектора основанного на многоканальных

фотодетекторах. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1411 - 1423, 2018.

42. Д.Д. Джаппуев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, А.Н. Куреня, Н.Ф. Клименко, А.С. Лидванский, О.И. Михайлова, В.Б. Петков, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Комплексная ливневая установка “Ковер-3” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1093 - 1102, 2018.

43. Д.Д. Джаппуев, В.Б. Петков, А.С. Лидванский, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, К.В. Птицына, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Эксперимент «Ковер-3»: поиск диффузного гамма-излучения с энергией свыше 100 ТэВ. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1064 - 1073, 2018.

44. А.Н. Куреня, И.С. Саванов, В.Б. Петков, А.В. Сергеев, Д.Д. Джаппуев, В.Б. Пузин, С.А. Нароенков, И.М. Дзапарова, А.Ф. Янин, М.А. Наливкин. Аппаратное и программное обеспечение систем регистрации ливневых установок «Андырчи» и «Ковёр-3». Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1343 - 1350, 2018.

45. Р.В. Новосельцева, М.М. Болиев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, А.Н. Куреня, Ю.Ф. Новосельцев, В.Б. Петков, А.Ф. Янин. Поиск нейтринных вспышек на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1103-1111, 2018.

46. М.М. Болиев, А.В. Буткевич, В.И. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, П.С. Стриганов, А.Ф. Янин. Поиск локальных источников нейтрино на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 49, вып. 4, стр. 1025 - 1030, 2018.

47. D.D. Dzhabpuev, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov, M.M. Khadzhiev, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, K.V. Ptitsyna, V.S. Romanenko, G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, A.F. Yanin, and Ya.V. Zhezher. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2. arXiv:1812.02663.

48. D.D. Dzhappuev, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov, M.M. Khadzhiev, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenja, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, K.V. Ptitsyna, V.S. Romanenko, G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, A.F. Yanin, and Ya.V. Zhezher. Carpet–2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events. arXiv:1812.02662.
49. И.М. Дзапарова, Д.Д. Джаппуев, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, М.А. Наливкин, С.А. Нароенков, В.Б. Петков, В.Б. Пузин, И.С. Саванов, А.В. Сергеев. Создание системы реального времени для проведения оперативного поиска и последующего изучения астрофизических объектов в оптическом и высокоэнергичном гамма-диапазонах. Изв. Крымской Астрофиз. Обс., v. 114, № 1, pp. 22–27, 2018.
50. I. Alikhanov, E. A. Paschos. Searching for new light gauge bosons at e+e- colliders. Phys. Rev. D 97 (2018) 115004.
51. И. А. Алиханов. Рождение пар лептонов в рассеянии нейтрино на атомных ядрах. ЭЧАЯ 49 (2018) 1185.
52. M.M. Boliev, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.I. Volchenko and A.F. Yanin. Search for astrophysical neutrino sources at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017; INR RAS, Moscow, 2018, p. 38.
53. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.S. Lidvansky, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A.Gorbacheva, I.M. Dzaparova, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenja, O.I. Mikhailova, K.V. Ptitsyna, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin. The Carpet-3 EAS array to search for cosmic diffuse ultra-high energy gamma-rays. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017; INR RAS, Moscow, 2018, p. 51.
54. M.M. Kochkarov, M.M. Boliev, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov. Fast neutron background in BUST for core-collapse supernova searches. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact

Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017, INR RAS; Moscow, 2018, p. 96.

55. A.N. Kurennya, I.M. Dzaparova, D.D. Dzhappuev, E.A. Gorbacheva, O.I. Mikhailova, M.A. Nalivkin, S.A. Naroenkov, V.B. Petkov, V.B. Puzin, I.S. Savanov, A.V. Sergeev, A.F. Yanin. Real-time multimessenger observation system for the search of optical counterparts of the high energy events. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017; INR RAS, Moscow, 2018, p. 102.

56. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurennya, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 37 years of exposure. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017; INR RAS, Moscow, 2018, p. 142.

57. V.B. Petkov, E.V. Bugaev, P.A. Klimai. Multimessenger search for evaporating primordial black holes. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017, INR RAS, Moscow, 2018, p. 158.

58. A.F. Yanin, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, A.N. Kurennya, V.B. Petkov, A.V. Sergeev. Development of a scintillation detectors based on the SiPM matrices: current status and prospects for the large volume neutrino detectors. Proceedings of the International Conference “SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy”, Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2-8 July 2017; INR RAS, Moscow, 2018, p. 231.

#### **Доклады на конференциях.**

В.Б. Петков. Нейтринная астрофизика. Эксперименты в Баксанской нейтринной обсерватории. Конференция “Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звездах”, Крым, п. Научный (КрАО РАН), 3-7 июня 2018 г. Устный доклад.

V.B. Petkov, A.S. Lidvansky. Carpet-2 limits on the isotropic diffuse gamma-ray flux between 100 TeV and 1 PeV. 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, July 6-10, 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russia. Устный доклад.

V.B. Petkov. The multi-messenger astronomy: experiments in the Baksan Neutrino Observatory. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhny Arkhyz (SAO). Устный доклад.

И.М. Дзапарова. Оперативный поиск астрофизических объектов в оптическом и высокоэнергичном гамма диапазонах. Конференция “Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звездах”, Крым, п. Научный (КРАО РАН), 3-7 июня 2018 г. Устный доклад.

И.М. Дзапарова, А.Ф. Янин. Development of the new data acquisition system for the Baksan Underground Scintillation Telescope. 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, July 6-10, 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russia. Стендовый доклад.

И.М. Дзапарова. Quick search for optical partners of bursts of very high energy gamma-ray radiation. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhny Arkhyz (SAO). Устный доклад.

D.D. Dzhappuev, A.U. Kudzhaev. The Carpet-3 multipurpose shower array for searching cosmic diffuse gamma rays with energy  $E_\gamma > 100$  TeV. The 3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2017) 22-26 October 2018, MEFhI. Устный доклад.

D.D. Dzhappuev, V.S. Romanenko. Limits on the isotropic diffuse gamma-ray flux between 100 TeV and 1 PeV: experiments Carpet-2 and Carpet-3. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhny Arkhyz (SAO). Устный доклад.

М.М. Kochkarov, Р.В. Новосельцева. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope. 26th Extended European Cosmic Ray

Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, July 6-10, 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russia. Стендовый доклад.

M.M. Kochkarov. Search for electron neutrinos in Baksan Underground Scintillation Telescope associated with gravitational-wave events. 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, July 6-10, 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russia. Стендовый доклад.

M.M. Kochkarov. Fast neutron background at the Baksan Underground Scintillation Telescope. 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, July 6-10, 2018, Altai State University, Barnaul-Belokurikha, Russia. Стендовый доклад.

M.M. Kochkarov. Fast neutrons in the Baksan Underground Scintillation Telescope: the background for core-collapse supernova searches. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhnij Arkhyz (SAO). Устный доклад.

A.N. Kurenya. DAQ system for the complex of the BUST – Andyrchy – Carpet-2 facilities. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhnij Arkhyz (SAO). Устный доклад.

R.V. Novoseltseva. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 38 years of exposure. International Conference The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, 7-14 October 2018, Nizhnij Arkhyz (SAO). Устный доклад.

V.S. Romanenko. Axion search and neutron dipole moment in cryogenic experiments with quantum receiver. XXth International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2018. Valday, Russia, 27 May - 2 June, 2018. Устный доклад.

И.А. Алиханов. Probability density distribution of the equivalent photons in the electron from  $ee \rightarrow \gamma Z$ . IV Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики», 22–26 мая 2018, Терскол, Россия. Устный доклад.

И.А. Алиханов. Resonance in the reaction  $ne \rightarrow \gamma W$ . V Международная научная конференция «Нелокальные краевые задачи и родственные проблемы математической биологии, информатики и физики», 4–7 декабря 2018, Нальчик, Россия. Устный доклад.

## **9. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ PRISMA-YBJ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА LHAASO**

59. Громушкин Д. М., Богданов Ф. А., Стенькин Ю. В., Щеголев О. Б., Юрин К. О. Исследование нейтронной компоненты ШАЛ на установке PRISMA-32. ЭЧАЯ, (2018), 49(4), с. 602
60. Громушкин Д.М., Богданов Ф.А., Лахонин А.А., Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б., Юрин К.О., Яшин И.И. Низкофоновый эн-детектор для исследования нейтронной компоненты ШАЛ. (2018), ЭЧАЯ, 49(1), с. 47
61. Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Степанов В.И., В.В., Щеголев и др. Отклик эн-детекторов установки PRISMA-YBJ на землетрясения. Известия РАН, сер. Физическая, (2019), в печати
62. Щеголев О.Б., Алексеенко В.В., Стенькин Ю.В. и др. Изучение массового состава космических лучей с энергией 1015 – 1017 эВ в проекте PRISMA. Известия РАН, сер. Физическая, (2019), в печати.
63. Yu.V. Stenkin and O.B. Shchegolev. On the cosmic ray energy spectrum “knees”. JoP (2019), in press
64. YURI STENKIN, VICTOR ALEKSEENKO, ZEYU CAI, et al. Response of PRISMA-YBJ detectors to Nepal earthquakes. Pure and Applied Geophysics. (2019), In press.

### **Доклады на конференциях.**

Stenkin Yu.V. On the cosmic ray energy spectrum “knees” – phenomenological approach. WASDHA2018, Moscow, ([http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Stenkin\\_Yuri.pdf](http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Stenkin_Yuri.pdf)), приглашенный доклад.

Alekseenko V.V. Variations of thermal neutron flux in the Moon-Earth-Sun geophysical relations. WASDHA2018, Moscow,



[http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Alekseenko\\_Victor.pdf](http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Alekseenko_Victor.pdf)), приглашенный доклад.

Oleg Shchegolev. Primary spectrum and mass composition of cosmic rays in PeV region.

WASDHA2018, Moscow,

([http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Shchegolev\\_Oleg.pdf](http://wasdha2018.inr.ac.ru/programme/talks/Shchegolev_Oleg.pdf)), приглашенный доклад

Yu. V. Stenkin. LHAASO Status and Perspectives. VLVnT-2018, Dubna, приглашенный доклад (<http://indico.jinr.ru/conferenceProgram.py?confId=633>)

Yuri Stenkin. Response of the PRISMA-YBJ detectors to earthquakes. 26th ECRS, Barnaul, (2018), <https://ecrs18.asu.ru/event/1/contributions/71/>

Oleg Schegolev. Study of mass composition of cosmic rays in  $10^{15}$ - $10^{17}$  eV region with PRISMA project, <https://ecrs18.asu.ru/event/1/contributions/133/>