

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 2020 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 2019 год)

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

Г.И. Рубцов  
«31» января 2020 г.

Москва 2020 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

Г.И. Рубцов  
(введение, заключение,  
раздел 14)

Исполнители:

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

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

О.Г. Ряжская  
(раздел 9)

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.  
РАН

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

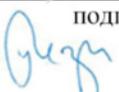
Г.В. Домогацкий  
(раздел 1,6)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

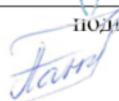
А.С. Лидванский  
(раздел 18)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

Л.Б. Безруков  
(раздел 8, 13, 17)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

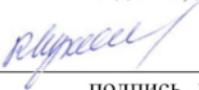
А.М. Гангапшев  
(раздел 12)

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.  
РАН

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

В.Н. Гаврин  
(раздел 7)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

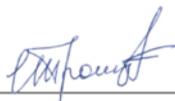
Р.А. Мухамедшин  
(раздел 15, 16)

Д.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

Ю.В. Стенькин  
(раздел 13)

Д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

  
\_\_\_\_\_ 31.01.2020  
подпись, дата

С.В. Троицкий  
(раздел 11, 13)

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 105 с., 41 рис., 4 табл., 32 источн., 0 прил.

**Ключевые слова:** НЕЙТРИНО, МЮОН, БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ГЛОБАЛЬНАЯ НЕЙТРИННАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ, СИСТЕМА VARS, ИСТОЧНИКИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО, НЕЙТРИННАЯ КАРТА НЕБА, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, РАСШИРЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ, СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО, ОСЦИЛЛЯЦИИ, СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО, ИСКУССТВЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРИНО, ГАЛЛИЕВАЯ МИШЕНЬ, НЕЙТРИНО, АНТИНЕЙТРИНО, СВЕРХНОВЫЕ, ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА НИЗКОФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ, ДВОЙНОЙ БЕТА-РАСПАД, КРИОГЕННЫЙ БОЛОМЕТР,  $^{100}\text{Mo}$ , ДЕТЕКТОР, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, МАССОВЫЙ СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, МЮОННЫЙ ИЗБЫТОК, АДРОННЫЕ МОДЕЛИ,

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2019 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

**1. Задача «Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершённых НИОКР».**

Объектом исследования являются устройства и методы глубоководной регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий.

Цель работы — создание и эксплуатация нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в озере Байкал для поиска и исследований потоков астрофизических нейтрино высоких энергий.

Работы в 2019 году выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры, повышению ее надежности, повышению производительности при изготовлении элементов телескопа, лабораторные испытания отдельных элементов и систем в сборе, комплектация и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовка инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировка элементов

и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания элементов и систем телескопа, монтаж новых кластеров телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах, прокладка донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

В результате в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2019 года были установлены 2 новых кластера и запущен в эксплуатацию телескоп из 5 кластеров с эффективным объемом 0,25 км<sup>3</sup>. Такой объем для глубоководных нейтринных телескопов достигнут впервые в мире. Российские ученые получили уникальную крупномасштабную установку для экспериментальных исследований в одном из самых актуальных направлений современной фундаментальной науки – астрофизики частиц высоких энергий и нейтринной астрономии. В соответствии с планами работ в 2022 году эффективный объем Baikal-GVD превзойдет эффективный объем самого большого нейтринного телескопа IceCube в льдах Антарктики – 0,4 км<sup>3</sup>.

## **2. Задача «Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»»**

Объектом исследования является комплекс устройств и программного обеспечения по сбору, передаче и накоплению данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Цель работы – создание базы экспериментальных данных по регистрации мюонов и нейтрино, доступных для исследований в области астрофизики и нейтринной астрономии, а также для обмена данными между научными коллаборациями.

Методология исследований и разработок заключается в выявлении новейших средств электроники, программных средств обработки больших массивов данных, разработки конкретных устройств, увеличивающих скорость сбора и передачи данных, точность калибровки, позиционирования и синхронизации систем телескопа, повышении скорости и автоматизации процессов обработки данных, разработки стандарта представления данных для обмена с зарубежными научными коллаборациями.

В результате выполнения работ в 2019 году в состав телескопа были установлены полупроводниковые импульсные лазеры для межкластерной калибровки оптических модулей, были испытаны устройства на основе магнитометрических инклинометров, позволивших снизить погрешность в определении координат оптических модулей до 10 см, испытаны новые системы синхронизации White Rabbit (CERN) и спецразработка НИИЯФ МГУ. В части разработки программного обеспечения введены в эксплуатацию работающие «on line» программы мониторинга состояния систем телескопа, программы автоматического

определения координат оптических модулей по данным гидроакустической системы позиционирования, автоматической калибровки по величине регистрируемых сигналов. Продолжены работы по расширению возможностей «off line» обработки данных пакета программ BARS, разработан блок программ по восстановлению траекторий мюонов. Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» по программе «multi-messenger» - получено в 2019 году более 20 «алертов». Разработки в рамках задачи 2 обеспечили в 2019 году непрерывный набор и накоплений данных телескопа Baikal-GVD из 5 кластеров.

Все разработки и результаты по задаче 2 уникальны и имеют важнейшее, ключевое значение для развития глубоководных нейтринных телескопов.

### **3. Задача «Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD»**

Предметом исследования являются физические и программные средства моделирования отклика регистрирующих систем телескопа на события взаимодействия нейтрино и вторичных мюонов с водной средой озера Байкал.

Цель исследования – оптимизация характеристик систем сбора и обработки данных телескопа с учетом аппаратных шумов и природного фона свечения вод озера Байкал, оптимизация и реализация методов восстановления параметров исходных частиц по данным телескопа.

Метод исследования заключается в физическом и программном моделировании работы телескопа. Физическое моделирование осуществляется с помощью стенда, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа. Программное моделирование заключается в пошаговом, на основании известных принципов, расчёте прохождения первичных частиц космических лучей до установки (с использованием пакетов CORSIKA, ANIS, MUM), определении светового поля в объёме детектора, амплитуд срабатывания оптических модулей, а затем наложении программного аналога аппаратного триггера с учётом текущей геометрии детектора, влияния шумов и параметров воды.

В результате для конфигурации телескопа из 5 кластеров были установлены оптимальные условия для триггеров, порогов по амплитуде регистрируемых сигналов и первичных фильтров, что позволило на порядки сократить поток передаваемой информации, минимизировать потери полезных сигналов и мертвое время при регистрации и передаче сигналов от Телескопа в Береговой центр, а при дальнейшей off line обработке выделять достоверные события актов взаимодействия мюонов с водной средой в пределах

эффективного объема телескопа (каскадов (ливней) и траекторий мюонов) и иметь модельный набор событий, позволяющий контролировать достоверность методов восстановления, применяющихся к реальным данным телескопа.

Использование результатов исследований при эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных и выделять при последующем анализе и обработке те события (6 событий), которые генерированы астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

#### **4. Задача «Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий»**

Предметом исследования являются современные математические и программные средства для обработки больших массивов экспериментальных данных для крупномасштабных физических установок.

Цель исследований – разработка приложений к системе BARS для максимально возможной автоматизации и ускорения процессов анализа и обработки данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Метод исследований – построение алгоритмов анализа и обработки, изучение и освоение наилучших практик методов анализа и обработки, создание программных приложений к системе BARS для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий.

В результате исследований завершен первый этап разработки: подготовка экспериментальных данных для выделения и восстановления событий в автоматическом режиме. Разработан пакет программ по автоматическому восстановлению координат оптических модулей по результатам гидроакустических измерений, автоматической калибровки данных по данным со светодиодных датчиков, новых средств фильтрации данных для подавления шумов и уровня фона. Продолжена разработка алгоритмов и программ по восстановлению траекторий мюонов.

Все разработанные приложения были включены в систему BARS и использовались для получения результатов исследований данных телескопа Baikal-GVD в поисках астрофизических нейтрино высоких энергий, потоков нейтрино атмосферного происхождения и в решении задачи темной материи. Пакеты программ разработаны с использованием мирового опыта разработки систем анализа и обработки данных для крупномасштабных установок.

## **5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий»**

Предмет исследования – потоки астрофизических нейтрино высоких энергий.

Цель исследований – поиск источников и построение нейтринной карты неба.

Метод исследований – многолетнее накопление и обработка данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, определение энергий и направлений прихода астрофизических нейтрино, использование информации, полученной другими научными группами и другими устройствами измерений.

В 2019 году выполнен анализ 6 347 294 573 экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, накопленных в 2016, 2018 и в первой половине 2019 года. В результате обработки и анализа был сформирован банк экспериментальных данных, содержащий 2704 события удовлетворяющих критериям отбора каскадов с энергией выше 10 ТэВ и с множественностью числа сработавших оптических детекторов телескопа больше десяти. После восстановления энергии и направления отобранных событий получено распределение возможных источников этих событий на небесной сфере.

В результате МК-моделирования с использованием данных IceCube были определены более строгие критерии отбора каскадных событий от диффузного потока нейтрино: множественность числа сработавших оптических детекторов должна быть больше или равна двадцати, а восстановленная энергия каскада выше 100 ТэВ с ожидаемой частотой регистрации 0,6 астрофизических нейтрино в год в одном кластере телескопа. По этим критериям было выделено шесть событий – первых кандидатов на роль нейтрино астрофизической природы, зарегистрированных в экспериментах на нейтринных телескопах, расположенных в Северном полушарии.

Существенным событием 2019 года является начало сотрудничества коллаборации Baikal-GVD с коллаборациями участниками международной научной программы «multi-messenger» исследований и получение в реальном времени данных о регистрации астрофизических событий другими установками. По триггеру нейтринного телескопа ANTARES в 2019 году было получено 26 таких сообщений («алертов») с временем регистрации, оценкой энергии нейтрино выше десятков тераэлектронвольт и направлений в звездных координатах с точностью меньше градуса. В течение 2019 года не были выявлены нейтринные события, зарегистрированные Baikal-GVD и совпадающие по времени и направлению с алертами эксперимента ANTARES.

В целом 2019 год стал прорывным в достижении целей этой задачи. Подтверждена высокая эффективность нейтринного телескопа Baikal\_GVD, как инструмента

исследования процессов, протекающих как во Вселенной в целом, так и в астрофизических объектах методом регистрации нейтрино высоких энергий. Зарегистрированы первые кандидаты на роль нейтрино астрофизической природы, число которых не противоречит данным нейтринного телескопа IceCube. Байкальский нейтринный телескоп в конфигурации 2019 года является новым экспериментальным комплексом способным предоставить уникальную информацию в рамках multi-messenger исследований в тесном взаимодействии с детекторами электромагнитного излучения и с гравитационными антеннами.

#### **6. Задача «Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц»**

Объект исследования – массив накопленных экспериментальных данных по регистрации вторичных мюонов и нейтрино телескопом Baikal-GVD.

Цель исследований – проверка гипотез о формах существования темной материи и других частиц, существование которых предсказывается в рамках расширения Стандартной модели и вне ее.

Методы исследований – анализ и обработка накопленных за годы данных для выявления избыточных потоков нейтрино прогнозируемого спектра энергий и направлений относительно фона нейтрино атмосферного происхождения.

В 2019 году продолжен анализ данных в рамках поиска проявлений темной материи в структуре потоков нейтрино высоких энергий, регистрируемых кластерами телескопа Baikal-GVD. К настоящему времени в каскадной моде реконструкции событий обработаны данные за 2016 год (один кластер), частично 2017 (два), 2018 (три) и 2019 (пять) годы. Тем самым сформирована начальная база данных для статистического анализа выбранных направлений на предполагаемые астрофизические объекты, как источники аннигиляций частиц темной материи, в заданных энергетических интервалах, соответствующих различным массам темной частицы. Стандартными источниками рассматриваются центр Галактики, темные сфероидальные карликовые галактики, Солнце и ядро Земли. До готовых к публикации результатов в 2019 году, в продолжение ранее опубликованных работ на телескопе меньшего объема, исследование не доведено, требуя дальнейшего изучения фона, в плане набора большей статистики данных и времени наблюдения, и более подробной симуляции сигнала компьютерными средствами. Однако, перспективы успеха с каждым годом возрастают в связи с существенным увеличением эффективного объема телескопа Baikal-GVD и увеличением скорости обработки данных.

**7. Задача «Измерение скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».**

Объектом исследования являются нейтринное излучение от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино.

Цель работы — Поиск короткобазовых нейтринных осцилляций и новых свойств нейтрино в экспериментах с искусственными источниками нейтрино.

В рамках работ в июле 2019 года стартовал эксперимент BEST с 3.4 МКи  $^{51}\text{Cr}$  источником. Выполнено 10 экспозиций источником двухзонной галлиевой мишени и 10 извлечений из каждой зоны мишени. Извлечения установлены в счетные системы на измерения, которые продолжаются.

Выполнены измерения активности источника по его тепловыделению в калориметрической системе. Из калориметрических измерений получена величина активности нейтринного источника, которая на момент начала измерений в БНО ИЯИ РАН составила  $3,41 \pm 0,02$  МКи. В мире впервые изготовлен искусственный источник нейтрино такой высокой интенсивности и впервые достигнута такая высокая точность в измерении такой активности.

Из спектрометрических измерений гамма излучения источника определены радиоактивные примеси, их активности в источнике и их вклад в тепловыделение источника.

**8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».**

Объектом исследования является проект нового большого сцинтилляционного детектора для регистрации нейтрино от природных источников.

Целью исследования поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа, а также создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора.

В качестве Нового большого сцинтилляционного жидкостного детектора (в частности, Нового баксанского нейтринного телескопа) для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников были рассмотрены детекторы двух типов в зависимости от цели.

Создан первый образец малоформатной установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора. Произведён анализ полученных данных.

### **9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».**

Объектом исследования являются редкие явления такие как вспышки Сверхновых звезд в нашей Галактике.

Целью работы является регистрация нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике и установление параметров моделей коллапсов звезд, а также изучение фоновых эффектов влияющих на сигналы подземных детекторов.

По данным работы нейтринного телескопа LVD за 27 лет работы, получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 11.7 г. на 90% уровне достоверности. По данным детектора АСД получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.2 г. на 90% уровне достоверности. Также проводился поиск совпадающих одиночных импульсов в детекторах БПСТ и LVD во время регистрации гравитационного сигнала от источника GW170817.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2019 году (с 01.01 по 29.12) составило 8265 часов (94.9% календарного времени).

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2019 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7817 часа, было зарегистрировано 53 мюонных нейтрино из нижней полусферы

### **10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».**

Объектом исследования являются нейтринные всплески от вспышек сверхновых звезд.

Целью исследования является передача информации о кандидатах на нейтринный всплеск в детекторе БПСТ в мировую сеть SNEWS.

Глобальную сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System— Система раннего оповещения о вспышках сверхновых) образуют детекторы Super-K, LVD, IceCube, Borexino, KamLAND, HALO, Daya Bay. Эта сеть, созданная в 2004 году, специально предназначена для поиска нейтринных всплесков от сверхновых. Информация с детекторов о кандидатах

на нейтринное событие посылается на сервер SNEWS в Брукхейвенскую национальную лабораторию, США. Цель SNEWS—предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы экспериментаторы могли наблюдать астрономические следствия гравитационного коллапса звезды. SNEWS увеличивает достоверность событий, детектируемых одновременно несколькими детекторами на пороге их чувствительности.

**11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».**

Объектом исследования является анализ данных установок Ковер-2 и TAIGA.

Цель работы — разработать новые численные методы анализа данных и применить их для определения первичного состава космических лучей.

Получены первые результаты поиска первичных фотонов с энергиями более 100 ТэВ, направленно связанных с высокоэнергетическими нейтринными событиями IceCube, по данным установки Ковер-2, полученным за период 1999–2011 (3080 дней работы) и 2018–2019 (342 дней работы). Результаты включают в себя верхние пределы с уровнем достоверности 95% для потоков фотонов PeV от суммированных направлений высокоэнергетических событий нейтрино IceCube. Также были представлены верхние пределы на потоки фотонов из набора из четырех предварительно определенных точечных источников: Crab, Cyg X-3, Mrk 421 и Mrk 501. Один из источников, Mrk 421, демонстрирует слабое превышение сигнала над фоном в обоих независимых наборах данных установки; его происхождение еще предстоит выяснить. Крабовидная туманность тоже демонстрирует незначительное превышение сигнала над фоном при переходе ко второму набору данных и будет подвергнута мониторингу.

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

**12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».**

Объектом исследования являются солнечные аксионы с 9.4 кэВ.

Целью работы является обнаружение аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе ядер  $^{83}\text{Kr}$  на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения  $A+^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma, e$  (9.4 кэВ). Для регистрации  $\gamma$ -квантов и электронов, возникающих в результате разрядки ядерного уровня, используется пропорциональный счетчик,

заполненный криптоном и размещенный в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории НЛГЗ-4900. По результатам измерений получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:  $|g_{A\gamma} \times mA| \leq 6.16 \times 10^{-17}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:  $mA \leq 12.6$  эВ (95% У.Д.)

Измерения продолжаются.

Параллельно, в 2019г. продолжены работы по исследованию возможностей создания детектора солнечных адронных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер  $^{57}\text{Fe}$  на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения  $A+^{57}\text{Fe} \rightarrow ^{57}\text{Fe}^* \rightarrow ^{57}\text{Fe} + \gamma, e$  (14.4 кэВ). Предварительно, в качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит ( $\text{FeS}_2$ ). Пирит является полупроводником, что может позволить использовать его как материал для полупроводникового детектора или криогенного болометра. В качестве альтернативы рассматриваются монокристаллы твердого раствора  $\text{GaS:Fe}$  и  $\text{Ga}_2\text{S}_3:\text{Fe}$  с содержанием железа до 5%.

### **13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»**

Объектом исследования являются результаты по изучению космических лучей, полученные на установках Telescope Array, Pierre Auger Observatory, IceCube Neutrino Observatory, EAS-MSU, NEVOD-DECOR, KASCADE-Grande, Yakutsk EAS Array, SUGAR, PRISMA.

Цель работы — изучение спектра и состава космических лучей высоких и сверхвысоких энергий, а также создание установки PRISMA-LHAASO в рамках международной обсерватории LHAASO.

Данная работа объединила результаты по изучению адронных взаимодействий и плотности мюонов восемь ведущих экспериментов по изучению космических лучей, и охватывает диапазон энергии ливней от ПэВ до десятков ЭэВ. В нескольких экспериментах сообщалось об избыточной плотности мюонов в ШАЛ по сравнению с предсказаниями адронных моделей. В то время как другие эксперименты сообщали об отсутствии расхождений между данными и результатами моделирования. В работе показано что избыток мюонов в наблюдаемых ШАЛ по сравнению с предсказаниями адронных моделей EPOS-LHC и QGSJet-II.04 увеличивается с ростом первичной энергии ливня с достоверностью 8 стандартных отклонений.

Работы по созданию высокогорной установки нового типа в 2019 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 и объяснен отклик эн-детекторов на землетрясения.

#### **14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».**

Объектом исследования являются анализ данных установки Telescope Array.

Цель работы — разработать новые численные методы анализа данных Telescope Array и применить их для определения первичного состава космических лучей.

В рамках темы "Расчётно-теоретические методы в физике космических лучей" получены важные результаты по поиску анизотропии в массовом составе космических лучей по данным эксперимента Telescope Array. Массовый состав анализируется с использованием метода ускоренных деревьев принятия решений. В этом методе для каждого события ШАЛ вводится один параметр  $\xi$ , который затем используется для определения средней атомной массы первичной частицы. Сам параметр  $\xi$  может неравномерно распределяться по небу, и таким образом его распределение по небу будет указывать на анизотропию первичного массового состава космических лучей сверхвысоких энергий. Чувствительность этого метода к возможной анизотропии проверяется с использованием моделирования ШАЛ вызванные первичными протонами и ядрами железа.

#### **15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях $10^{11} - 10^{17}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях».**

Объектом исследования являются т.н. фрагментационная область вторичных частиц ( $x_F \approx E/E_0 > 0.01$ ) в адрон-ядерных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях, выше энергий Большого Адронного Коллайдера (LHC) ( $\sqrt{s} < 14$  ТэВ в системе центра масс, с.ц.м.).

Цель работы — создание программного пакета для детального моделирования взаимодействий адронов при сверхвысоких энергиях.

Эксперименты на LHC дают информацию, в основном, о параметрах центральной кинематической области взаимодействий адронов ( $\eta < 5 - 6$ ), играющей второстепенную роль в развитии т.н. широких атмосферных ливней (ШАЛ). Информация о фрагментационной области во взаимодействиях нуклонов с ядрами имеется только при

энергиях ниже  $\sqrt{s} < 63$  ГэВ. В связи с появлением новых экспериментальных данных на LHC, проведена дальнейшая отработка программного пакета FANSY 2.0, разработанного для моделирования взаимодействий адронов  $10^{11} - 10^{20}$  эВ. FANSY 2.0 с относительно хорошей точностью воспроизводит широкий набор экспериментальных данных, полученных на 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). Также воспроизводятся результаты экспериментов при низких энергиях в протон-протонных взаимодействиях во всей области значений  $x_F < 1$ , которая является наиболее эффективной при развитии каскадов от первичных космических частиц.

#### **16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»**

Объектом исследования являются азимутальные эффекты в фрагментационной области адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

Цель работы — изучения возможных путей сравнительного анализа данных LHC по азимутальной асимметрии заряженных адронов и результатов моделирования компланарности наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях, обнаруженной в космических лучах.

Показана непротиворечивость обоих наборов экспериментальных данных друг другу и 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.

#### **17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью $10^{-19}$ Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям».**

Объектом исследования является оптоакустическая гравитационная антенна (ОГРАН).

Целью исследования является запуск антенны ОГРАН в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям

Произведена модернизация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН с целью запуска её в режим непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям.

**18. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»**

Объектом исследования являются вариации вторичных частиц космических лучей и локальные возмущения геомагнитного поля в период магнитосферных суббурь.

Цель работы — исследование атмосферно - ионосферных эффектов на средних широтах в период магнитосферных суббурь.

Используя ранее разработанный авторами метод диагностики электрического состояния грозовой атмосферы по вариациям вторичных частиц космических лучей регистрируемых установкой «Ковёр», привлекая данные сторонней (удаление 75 км) непрерывной видеорегистрации неба над ней и данные по измерению локальных (~100 км) вариаций геомагнитного поля, предоставленные Северокавказской геофизической лаборатории ИФЗ РАН, зарегистрировано явление взаимного влияния магнитосферной бури с грозовой активностью. Установлено, что во время магнитосферных суббурь малой мощности на предварительной стадии и в начале фазы развития возможно проникновение магнитосферно – ионосферных возмущений на средние широты ~40° над грозовыми очагами. Проявляется оно в виде диффузного свечения типа «полярное сияние» яркостью  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup> и локальных возмущений электрического поля с характерной разностью потенциалов в тропосфере  $\pm 100$  МВ. В работе, впервые, зарегистрированы факты внезапного появления во время магнитосферных возмущений, горизонтальной разности потенциалов порядка 100 МВ на масштабе 10-30 км, без признаков грозовой активности. А так же, появление локального магнитного возмущения (~1 нТл), соответствующее возникновению локального вертикального тока, максимум которого совпал с началом взрывной фазы зарождения суббури.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
РЕФЕРАТ .....	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	16
ВВЕДЕНИЕ.....	19
1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершённых НИОКР (Задача №1).....	31
1.1. Методология выполнения исследования .....	31
1.2. Результаты исследований.....	31
1.3. Применение и значимость результатов исследования.....	40
2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (Задача №2) .....	40
2.1. Методология выполнения исследования .....	40
2.2. Результаты исследований.....	41
2.3. Применение и значимость результатов исследования.....	44
3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача №3) .....	45
3.1. Методология выполнения исследования .....	45
3.2. Результаты исследований.....	45
3.3. Применение и значимость результатов исследования.....	48
4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача №4).....	48
4.1. Методология выполнения исследования .....	48
4.2. Результаты исследований.....	48
4.3. Применение и значимость результатов исследования.....	49
5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий (Задача №5) .....	50
5.1. Методология выполнения исследования .....	50
5.2. Результаты исследований.....	50
5.3. Применение и значимость результатов исследования.....	53
6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача №6) .....	53
6.1. Методология выполнения исследования .....	53
6.2. Результаты исследований.....	53

6.3.	Применение и значимость результатов исследования .....	54
7.	Первый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) (Задача № 7).....	54
7.1.	Измерение активности искусственного источника .....	55
8.	Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора (Задача № 8).....	57
9.	Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD (Задача № 9) .....	59
9.1.	Анализ данных детекторов LVD и АСД.....	59
9.2.	Анализ данных детектора БПСТ .....	60
9.3.	Поиск совпадений в детекторах БПСТ и LVD во время гравитационного сигнала от источника GW170817 .....	67
10.	Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS (Задача №10).....	69
11.	Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОБЕР-2 и TAIGA. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ (Задача №11) .....	70
11.1.	Анализ данных полученных на установке Ковер-2 .....	70
11.2.	Участие в работе международной коллаборации TAIGA .....	71
12.	Получение ограничений или обнаружение солнечных адронных аксионов (Задача №12).....	72
13.	Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ (Задача №13) .....	74
13.1.	Изучение проблемы мюонного избытка в данных ведущих экспериментов по изучению космических лучей. ....	74
13.2.	Создание установки PRISMA-LHAASO в рамках международной обсерватории LHAASO .....	74
14.	Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере (Задача №14).....	77
15.	Разработка новой модели взаимодействий адронов FANSY 2.0 воспроизводящей, во-первых, более широкий (сравнительно с другими моделями) круг основных экспериментальных результатов в области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; во-вторых, моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача №15).....	77
16.	Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам, наблюдаемым в экспериментах на БАК и в космических лучах (Задача № 16).....	78

17. Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывной регистрации с чувствительностью $10^{-19}$ Гц <sup>1/2</sup> к метрическим вариациям (Задача № 17).....	78
18. Организация прецезионных измерений вариаций электрического и магнитного полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов (Задача № 18).....	80
18.1. Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике конкретных гроз .....	80
18.2. Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, посредством медленного пробоя на убегающих электронах в припороговом режиме.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	85
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	92
ПУБЛИКАЦИИ.....	95

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. Задача «Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР»

В 2019 году были продолжены работы по развитию научного экспериментального комплекса и инфраструктуры Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) с целью создания на его базе нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (проект Baikal-GVD).

В настоящее время в мире существуют три действующих аналогичных по принципам устройства и размещения в природных средах крупномасштабных нейтринных телескопов: IceCube на Южном полюсе, ANTARES в Средиземном море и Baikal-GVD в озере Байкал, и проект KM3Net в Средиземном море, который находится в начальной стадии своего развития. Проект KM3NeT является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба. 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 км<sup>3</sup>, содержащий примерно 2000 фотодетекторов (оптических модулей), размещенных на 115 гирляндах. В настоящее время во Франции и в Италии установлены 4 экспериментальные гирлянды, ведутся их натурные испытания и доработка технологий установки гирлянд будущего телескопа. доработка технологий установки гирлянд будущего телескопа. Первоначально объявленной целью проекта являлось развертывание к 2020 году двух блоков с общим эффективным объемом порядка одного кубического километра и шести блоков с общим объемом порядка 3 км<sup>3</sup> к 2015 году, но в силу возникших технических трудностей в ходе реализации проекта эти сроки сдвигаются на 3-4 года относительно первоначальных планов.

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. Завершение работ по созданию на Южном полюсе телескопа IceCube и официальная инаугурация проекта произошли 27 апреля 2011 года.

Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять на один-два порядка чувствительность экспериментальных исследований. На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов)

способного(ых) дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов)вести исследования природных потоков нейтрино на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, которая в 2019 г. развернула в озере Байкал и запустила в режим набора данных 5 кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD.

## **2. Задача «Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»**

Начало создания «Глобальной нейтринной обсерватории» (GNO) и ее первого этапа «Глобальной нейтринной сети» (GNN) было положено подписанием 15 октября 2013 года меморандума полномочными представителями 4 научных коллабораций: IceCube, ANTARES, KM3NeT, Baikal-GVD. Конечной целью кооперации было заявлено создание единой регистрирующей инфраструктуры из находящихся на разных континентах нейтринных телескопов сопоставимых масштабов. Такое объединение усилий в мировом масштабе диктуется прежде всего научными предпосылками в связи с крайне малым прогнозируемым количеством регистрируемых событий, вызываемых астрофизическими нейтрино высоких энергий, каждым из телескопов (от нескольких до нескольких десятков событий в год). Достичь полной унификации в системах сбора и обработки данных практически невозможно в связи с существенными различиями в условиях работы и конструкции телескопов, поэтому задача решается унификацией форматов и представления данных.

Интенсивный обмен результатами работ и данными производится на ежегодных совещаниях (MANTS) и раз в два года на расширенной конференции (VLVNT). Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом.

## **3. Задача «Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD»**

Нейтринные телескопы типа Baikal-GVD крайне сложные многопараметрические системы с не точно определенными условиями на входе и выходе системы в условиях превосходящих естественных фонов и шумов приемного тракта. Неточности на входе возникают из-за изменения внешних условий регистрации (характеристик прозрачности и рассеяния байкальской воды, собственного светового фона, обрастания приемных датчиков, индивидуальных особенностей приемников – ФЭУ). Шумы и нестабильности в трактах систем сбора и передачи данных с большого множества распределенных в

пространстве датчиков также влияют на амплитуды и формы принимаемых сигналов. Для выделения полезных сигналов из превосходящего уровня фонов и шумов используется методика последовательного сравнения и приближения результатов компьютерного моделирования и реальных экспериментальных данных, в результате которой определяются оптимальные приемные характеристики телескопа и которые регулируются выставлением порогов и триггерных условий включения приемных каналов телескопа. Эти характеристики устанавливаются в телескопе дистанционно программным способом. Программное моделирование осуществляется расчетами методом Монте Карло работы телескопа по регистрации нейтринных (мюонных) событий с учетом текущей геометрии телескопа, различия видов взаимодействия мюонов и нейтрино с водной средой и влияния шумов и фонов.

Благодаря использованию этой методики, в 2010-2011 годах была рассчитана оптимальная кластерная конструкция проектируемого телескопа Baikal-GVD.

Такая же методика сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами используется и в off line анализе и обработке данных с постепенным приближением к минимуму в их различии.

Физическое моделирование осуществляется с помощью стендов, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа и по результатам анализа принимаются решения о способах устранения неисправностей или повышения эффективности систем.

#### **4. Задача «Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий»**

Параллельно с расширением телескопа разрабатывалась адекватная система управления телескопом, сбора и обработки данных. Количество поступающих с телескопа данных достигло терафлопов, что, естественно, потребовало использования самых современных методов обработки больших массивов данных. На основе уже используемых пакетов программ в мировой практике была разработана собственная, адекватная телескопу система BARS (BARS - Baikal Analysis and Reconstruction Software) для работы с данными участников коллаборации «Байкал». С помощью системы производится первичная обработка, включающая восстановление событий и моделирование работы телескопа методами Монте-Карло. Многие процессы обработки данных уже автоматизированы и ведется работа по автоматизации всех процессов первичной обработки, включая процессы калибровки и представления результатов экспериментов. Необходимые мощности вычислительных систем были предоставлены ОИЯИ (Дубна).

## **5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий»**

К 2011 году уровень знаний о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий ( $10^{13} - 10^{18}$ ) эВ, 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.

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. Наиболее значимым для дальнейшего развития нейтринной астрофизики явились 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.

В 2019 году чувствительность, достигнутая на телескопе из 5 кластеров Baikal-GVD, вплотную приблизилась к чувствительности IceCube, что позволило приступить к решению задач астрофизики, нейтринной астрономии и космологии, перспективы которых были открыты впервые результатами регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий, а также в исследованиях последних лет в поисках нейтрино от астрофизических

источников, диффузных потоков нейтрино и первых результатов построения нейтринной карты неба.

#### **6. Задача «Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц»**

Существует множество гипотез о формах существования темной материи и местах ее скоплений во Вселенной. Экспериментальную проверку этих гипотез предполагается осуществить регистрацией потоков нейтрино определенного спектра энергий, возникающих в результате распада или аннигиляции частиц темной материи в местах их скоплений. Кандидатами в частицы темной материи рассматриваются как сами нейтрино, так и частицы, физическая природа которых выходит за рамки Стандартной модели (WIMP, стерильные нейтрино, аксионы и др.).

Раскрытие тайны темной материи уже на протяжении десятилетий остается одним из актуальных предметов и направлений теоретических и экспериментальных исследований. Создается целый ряд детекторов для регистрации и идентификации частиц темной материи по предполагаемым признакам. Каждый из нейтринных телескопов с момента их создания включал в программу исследований поиск частиц темной материи так же, как и первый в мире Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ-200. Исследования в этом направлении с расширенными возможностями продолжаются с момента установки в 2016 году первого полноценного кластера телескопа Baikal-GVD и по настоящее время.

#### **7. Задача «Измерение скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».**

Поиск стерильных нейтрино одна из актуальных задач фундаментальной науки, стоящая в одном ряду с открытием нейтринных осцилляций, показавших существование массы нейтрино и новой физики за пределами Стандартной Модели (СМ). Существующая СМ с тремя активными нейтрино не согласуется с полученными в ряде предыдущих нейтринных экспериментов (ускорительных, галлиевых с интенсивными искусственными источниками, реакторных с расстояниями до 100 м) результатами, для объяснения которых требуется введение четвертого нестандартного стерильного нейтрино с масштабом массы порядка 1 эВ. В работе [7] представлен ряд экспериментов по поиску стерильных нейтрино с использованием атомных реакторов, ускорителей, а также высокоинтенсивных

искусственных источников нейтрино и антинейтрино. В настоящее время идёт подготовка и реализация нескольких из них с различными источниками нейтрино. В новых нейтринных экспериментах получены противоречивые результаты.

Использование компактных интенсивных искусственных источников предоставляет уникальную возможность исследования картины осцилляций в стерильные состояния на очень коротких расстояниях с известным моноэнергетическим потоком нейтрино. С использованием высокоинтенсивного источника нейтрино  $^{51}\text{Cr}$  предложен Баксанский эксперимент по поиску на очень коротких расстояниях осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на двойной металлической Ga мишени (BEST) [7-11] на базе УНУ Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

#### **8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».**

В последнее время активно обсуждаются проекты Нового поколения (в частности, проект Нового баксанского нейтринного телескопа) по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников, в том числе измерения солнечных нейтрино CNO цикла. Фундаментальной задачей для таких детекторов является измерение потоков геоантинейтрино от распадов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , содержащихся в земных недрах. Регистрация потоков этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли. Потоки антинейтрино от  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  уже измерены (правда, с не очень высокой точностью, на уровне 25%). Особую важность экспериментального изучения потока геоантинейтрино (и возможно геонейтрино) от распадов  $^{40}\text{K}$  возникает в связи с предсказанием большого количества калия в составе Земли в модели «богатая водородом Земля».

В сцинтилляторах для исследования слабых нейтринных потоков очень важной характеристикой является радиационная чистота. В низкоэнергетической области (< 150-200 кэВ) основной вклад в фон вносит радиоактивный изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  (граничная энергия бета-спектра 156.48 кэВ). На БНО ИЯИ РАН создается малоформатная установка для измерения концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$  в жидких углеводородах, которые являются основой для низкофоновых сцинтилляторов.

#### **9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».**

Все астрономическое научное сообщество ждет коллапса сверхновой звезды, частота которых по современным наблюдениям в спиральных галактиках должна быть раз в  $\sim 30$  лет. Со времени предыдущей вспышки Сверхновой в нашей галактике прошло уже более 300 лет, а SN1987A вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке. Подземные установки АСД, БПСТ и LVD специально проектировались для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

На уникальном комплексе экспериментальных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Для выполнения исследований установки комплекса в течение 2019 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.

Создан архив экспериментальных данных установок за 2019 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.

#### **10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».**

В детекторе LVD поиск кластеров кандидатов-событий для SNEWS осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20$  с и с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4$  МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Вероятность имитации фоном импульсов, при ожидаемой частоте коллапсов в Галактике – один раз в 50 лет, равна, где  $m$  – частота фоновых импульсов,  $t$  - длительность пачки импульсов,  $k$  – число импульсов в пачке.

#### **11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».**

Одной из важной задачи физики космических лучей - поиск гамма излучения сверхвысоких энергий. Интерес к поиску фотонов с энергией свыше 100 ТэВ связан с обнаружением экспериментом IceCube нейтрино высоких энергий. В большинстве астрофизических моделях нейтрино высоких энергий образуются в распадах заряженных

$\pi$ -мезонов. Эти мезоны, в свою очередь, рождаются в адронных и фотоадронных процессах, которые всегда сопровождаются рождением нейтральных  $\pi_0$ . Последние сразу распадаются на пары фотонов, что обеспечивает сопутствующие потоки гамма-излучения, аналогичные потокам нейтрино. Такое многоканальное наблюдение как за астрофизическими нейтрино, так и за высокоэнергичного гамма излучения поможет подтвердить или опровергнуть различные модели источников космических лучей

ИЯИ РАН участвует в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

## 12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».

Наиболее естественное решение CP-проблемы сильных взаимодействий было получено путем введения новой киральной симметрии, спонтанное нарушение которой при энергии  $f_A$  полностью компенсирует CP-неинвариантный член в лагранжиане квантовой хромодинамики (КХД) и приводит к появлению аксиона. На данный момент развиты модели двух классов “невидимого” аксиона. Это модели адронного (или KSVZ)-аксиона, и GUT- или DFSZ-аксиона. Масса аксиона  $m_A$  в обеих моделях может быть выражена через свойства  $\pi_0$ -мезона:

$$m_A = \frac{m_\pi f_\pi}{f_A} \left[ \frac{z}{(1+z)(1+z+w)} \right]^{1/2}$$

где  $m_\pi$  и  $f_\pi$  – масса и константа распада пиона,  $z = m_u / m_d = 0.56$  и  $w = m_u / m_s = 0.029$  – отношения масс кварков. Значения  $z = 0.56$  и  $w = 0.029$  являются общепринятыми в аксионной литературе, хотя существующие экспериментальные данные разрешают достаточно широкий интервал для возможных значений  $z$  и  $w$ . Ограничения на массу аксиона возникают как следствие экспериментальных ограничений на константы связи аксиона с фотонами ( $g_{A\gamma}$ ), электронами ( $g_{Ae}$ ) и нуклонами ( $g_{AN}$ ), которые, в свою очередь, являются модельно зависимыми величинами. Если аксион существует, Солнце должно быть одним из наиболее мощных его источников. Целью данной работы является поиск монохроматических аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе в ядрах  $^{83}\text{Kr}$  на Солнце. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения путем регистрации частиц ( $\gamma$  и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Вероятность испускания и последующего поглощения аксионов зависит только от константы связи с нуклонами, которая является наименее модельно-зависимой и пропорциональна  $(g_{AN})^4$ .

### **13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»**

Экспериментальные исследования физики космических лучей сильно осложнены из-за малости потока частиц ультравысоких энергий. По этой причине во всех существующих экспериментах свойства космических частиц ультравысоких энергий определяются косвенным образом по характеристикам широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами в атмосфере Земли. Для определения первичной энергии и состава космических лучей чрезвычайно важно понимать механизм развития ШАЛ, в котором ключевую роль играют адронные взаимодействия. От протекающих в ШАЛ процессов рождения и распадов адронов зависит количество мюонов в нём. Как раз в большинстве случаев по мюонной компоненте определяют первичный состав космических лучей. Сравнение наблюдаемой плотности мюонной компоненты ШАЛ в данных различных экспериментов показывает существенный недостаток числа мюонов, которое предсказывают современные адронные модели.

Основной задачей в проекте PRISMA 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 (ENDA – Electron-Neutron Detector Array) 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. В декабре 2019 г. там был развернут первый кластер установки ENDA из 16 эн-детекторов

### **14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».**

Не смотря на более столетнюю историю изучения космических лучей остается ряд нерешенных проблем: не известны ни механизмы ускорения космических лучей, ни их источники, ни точный первичный состав. Изучение анизотропии направления прихода космических лучей и их первичного состава поможет дать ответы на данные вопросы.

### **15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях $10^{11} - 10^{17}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»**

Известно, что общепризнанных 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 LHC, в настоящее время не существует. Это связано с тем, что эксперименты на LHC дают информацию, в основном, о параметрах центральной кинематической области псевдобыстрот взаимодействий адронов ( $\eta < 5 - 6$ ), которая играет второстепенную роль в развитии ШАЛ. Информация о наиболее важной фрагментационной области ( $x_F > 0.01 - 0.05$ ) во взаимодействиях нуклонов с ядрами имеется только при энергиях ниже  $\sim 2$  ТэВ в Лабораторной системе, т.е. при  $\sqrt{s} < 63$  ГэВ в системе центра масс (с.ц.м.). 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 модели 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.

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 и сравнения расчетных результатов, получаемых методом Монте-Карло, с накопленными экспериментальными данными.

#### **16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»**

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 наиболее энергичных

вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях при сверхвысоких энергиях ( $E_0 > 10^{16}$  эВ). 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.

С другой стороны, в эксперименте CMS на LHC был обнаружен т.н. “long-range ridge effect”, т.е. азимутальная асимметрия заряженных частиц на большом ( $\eta > 4$ ) расстоянии в пространстве псевдобыстрот в событиях с большой множественностью ( $n_{ch} > 90$ ). Поскольку эксперименты с РЭК и на LHC используют совершенно разные критерии отбора изучаемых событий, то возникает проблема сопоставления этих явлений и поиска возможной связи между ними. Для её решения необходимо использовать модель, позволяющую моделировать подобные процессы при различных критериях отбора событий.

#### **17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью $10^{-19}$ Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»**

В подземной лаборатории на БНО ИЯИ РАН производятся работы по созданию оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН). Задачей ближайшего времени является запуск антенны ОГРАН в режим непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям.

#### **18. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»**

По материалам, доложенным на конференциях в 2018г. была опубликована работа [29] где был продемонстрирован случай регистрации свечения ночного неба над установкой во время грозы на фоне магнитосферной бури 24-25.07.2014 малой мощности, сопровождаемой серией суббурь. По вариациям мюонов было зарегистрировано возникновение серии локальных возрастаний разности потенциалов в тропосфере, прерываемых землетрясениями в регионе (моменты 1:52 и 2:09), либо развитием суббури (момент 2:30). В момент второй активизации суббури (3:04) был отмечен импульсный разряд, зарегистрированный так же по вариациям мюонов. В работе было высказано мнение, что эта активизация сопровождалась скачком положительного поля в стратосфере,

который привел к высотному разряду с области отрицательно заряженной периферии. Эффекты магнитосферной бури в мюонной интенсивности продолжались и днём, после грозы, что в публикации не рассматривалось. В 2019 г, эти эффекты рассмотрены более подробно. Для анализа событий были дополнительно привлечены данные измерений вариаций геомагнитного поля, произведённые на территории БНО и в удалении 70 км – в верховьях реки Кубань силами Северокавказской геофизической лаборатории ИФЗ (скважность - 1/с точность 0.1 нТл). Возмущение разницы показаний означает возникновение локального магнитного поля, порождаемого локальным током в удалении ~ 100 км (т. е. ток в системе тропосфера – стратосфера - ионосфера в районе БНО).

# **1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершенных НИОКР (Задача №1)**

## **1.1. Методология выполнения исследования**

Работы в 2019 году выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры, повышению ее надежности, повышению производительности при изготовлении элементов телескопа, лабораторные испытания отдельных элементов и систем в сборе, комплектация и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовка инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировка элементов и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания элементов и систем телескопа, монтаж новых кластеров телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах, прокладка донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

## **1.2. Результаты исследований**

Запуск в эксплуатацию в 2015 году первого кластера Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD<sup>1</sup> открыл новый этап в создании нейтринного телескопа в озере Байкал с объемом порядка 1 кубического километра. Был закончен основной исследовательский этап разработки всех элементов телескопа и его монтажной единицы – кластера из 8 гирлянд, и открыт путь к планомерному расширению телескопа установкой от одного до двух кластеров в год. В период зимней экспедиции 2016 года детектирующий объем кластера был увеличен в полтора раза за счет развертывания 96 дополнительных оптических модулей (по 12 оптических модулей на каждой гирлянде). В период зимней экспедиции 2017 года на оз. Байкал был развернут второй кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD, в 2018 - третий кластер, а в 2019 были развернуты еще два кластера. Таким образом, в результате работ, выполненных за 2019 год, на оз. Байкал функционирует установка, содержащая в общей сложности 1440 оптических модулей с эффективным объемом порядка 0,25 км<sup>3</sup>, что составляет около 60% от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино астрофизической природы. На рисунке 1 показан рост эффективного объема телескопа для регистрации ливней (каскадов) заряженных частиц, возникающих в результате взаимодействия нейтрино и вторичных мюонов с водной средой в области энергий 100 TeV – 10 PeV, черенковское свечение

которых регистрируется телескопом. Зеленой и красной линиями обозначены эффективные объемы телескопов ANTARES и IceCube соответственно. Синей линией обозначен достигнутый уровень эффективного объема Baikal-GVD и прерывистой - планируемый уровень в последующие годы. Данные по создаваемому Европейским союзом нейтринному телескопу KM3NeT в Средиземном море не приводятся в связи с возникшими техническими сложностями в развертывании систем телескопа и отсутствия подтвержденных экспериментальных данных.

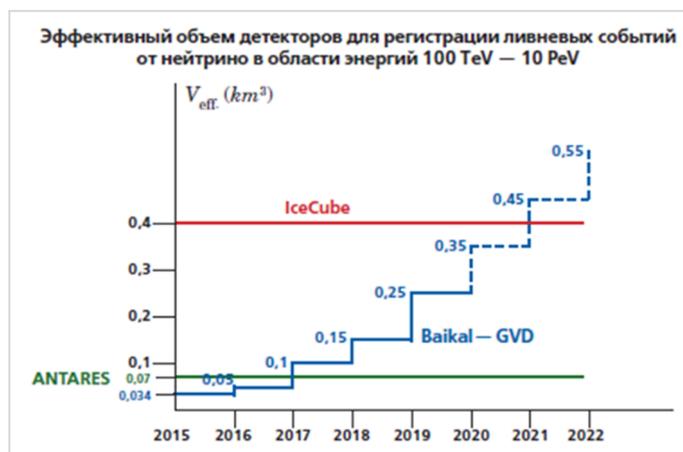


Рис. 1. Рост эффективного объема телескопа Baikal-GVD в результате установки новых кластеров

При ожидаемом ходе развития Байкальского проекта в течении ближайших трех лет, на нейтринном телескопе BAIKAL-GVD в конфигурации 2022 года можно будет ожидать регистрации не менее 6 - 8 нейтрино астрофизической природы в год, и он станет одним из двух мощнейших в мире инструментов их изучения.

Важнейшим преимуществом телескопа Baikal-GVD при сравнении с нейтринным телескопом IceCube является его высокое угловое разрешение при определении направления движения нейтрино, что обусловлено различием оптических свойств пресной воды и льда. В частности, для моды регистрации нейтрино, основанной на детектировании вторичных ливней, точность определения направления нейтрино в нейтринном телескопе Baikal-GVD составит 3-4 градуса, в сравнении с 10-15 градусами в IceCube. Это соответствует увеличению точности позиционирования локальных источников нейтрино более чем на порядок величины по сравнению с IceCube и открывает возможность для постановки и решения задач нейтринной астрономии с использованием ливневой моды детектирования нейтрино.

Монтаж новых систем телескопа производится с ледяного покрова озера Байкал во

время зимних экспедиций с 15 февраля по 15 апреля ежегодно, начиная с 1993 года. Для этого в четырех километрах от берега в районе 106 км КБЖД разбивается Ледовый лагерь (рисунок 2), который оборудуется автономным электроснабжением, радиосвязью, лебедками и подсобными помещениями.

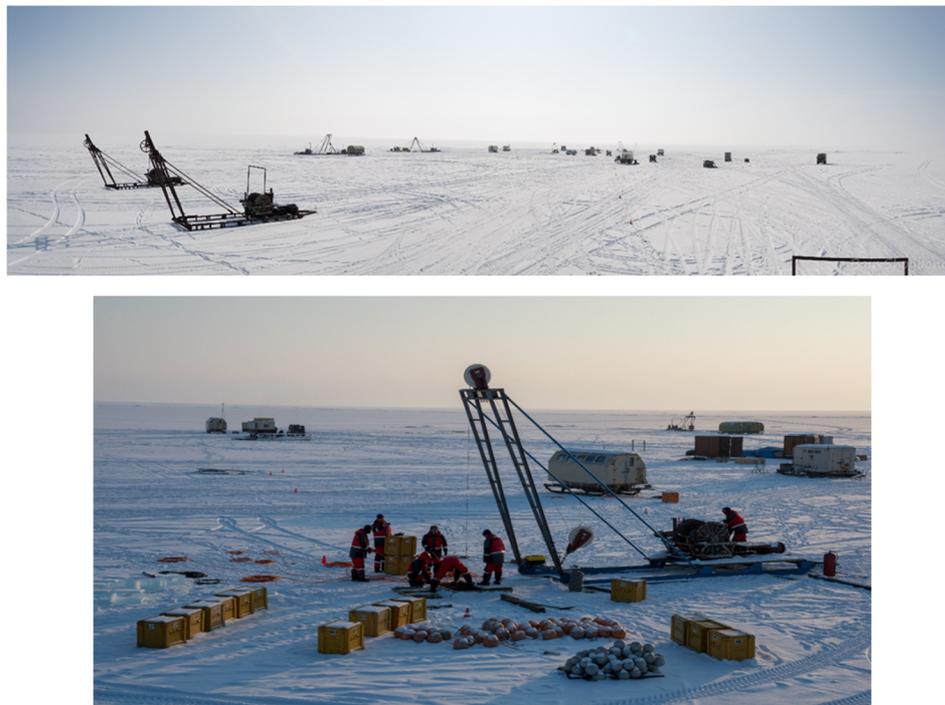


Рис. 2. Верхний (а), нижний (б)

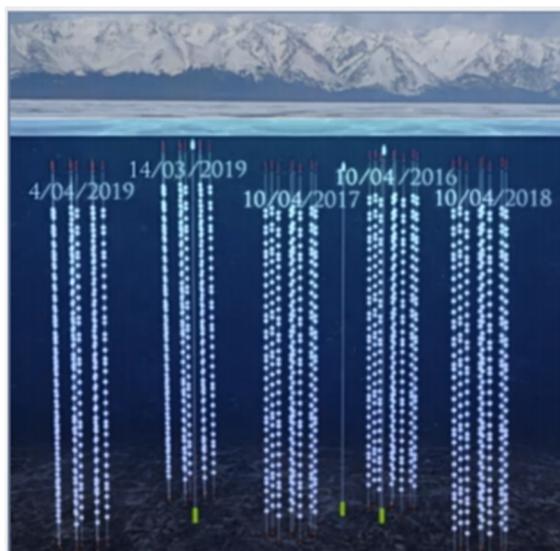


Рис. 3. Схема установки Baikal-GVD

Телескоп из 5 кластеров Baikal-GVD состоит из 40 гирлянд, на каждой из которых размещено 36 оптических модулей (ОМ) на расстоянии 15 м друг от друга по вертикали на глубине от 1275 до 750 м в 4 км от берега озера Байкал (Рисунок 3).

Кластеры телескопа содержат по 8 гирлянд одной центральной и семи периферийных, размещенных равномерно по окружности радиусом 60 м. Центры кластеров располагаются на расстоянии 300 м друг от друга.

В вертикальном положении гирлянды удерживаются специально сконструированными якорями и системой пластиковых поплавков на глубине 20-30 м от поверхности. В верхней точке гирлянд под поплавками располагаются модули управления – центральный модуль гирлянды, соединенный кабелями с центральными модулями секций и центральным модулем кластера (рисунок 4), и служебный (коммутационный), через который распределяется электропитание и подключаются гидроакустические модемы. ОМ в гирлянде сгруппированы по секциям – 3 секции по 12 ОМ плюс управляющий (центральный) модуль секции, соединенный с каждым ОМ секции кабелем. В центральном модуле каждой секции (рисунок 5) осуществляется непрерывное сканирование аналоговых выходов двенадцати оптических модулей 12-битными АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. При реализации триггерных условий формируются временные кадры каналов – преобразованные в цифровой код последовательные наборы амплитуд входных сигналов.

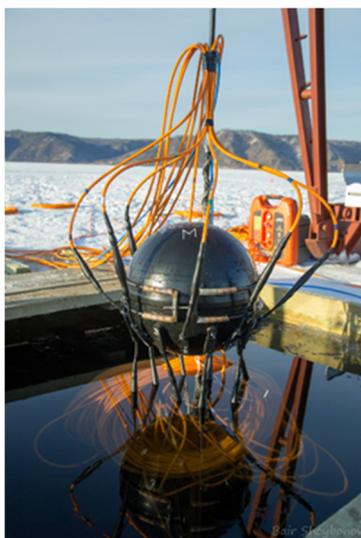


Рис. 4.



Рис. 5.

Каждый кадр содержит информацию о сигналах, поступивших с канала в течении 5 мкс. Использование методики сканирования при помощи быстрых АЦП существенно увеличивает информативность физических событий.

Каждый ОМ (рисунок 5) содержит внутри стеклянной сферы фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой эффективностью около 35%. На рисунке показана подготовка оптического модуля к погружению. Гирлянды с ОМ сгруппированы в пять кластеров – 288 ОМ на кластер. Общее

количество ОМ – 1440.



Рис. 6. Установка гирлянды



Рис. 7.

Каждый кластер представляет собой независимую глубоководную установку, управляемую центром кластера (рисунок 6), соединенную с береговым центром управления и сбора данных собственной электрооптической линией связи.

На каждой гирлянде также штатно размещаются до 5 гидроакустических модемов (рисунок 7), в частности на якорях гирлянд. Гидроакустические модемы формируют систему позиционирования, которая обеспечивает определение пространственных координат ОМ с точностью около 15 см. Система гидроакустического позиционирования разрабатывалась совместно с компанией EvoLogics (Германия). Точность определения координат подвижных модемов на гирляндах 3-4 мм, точность определения координат самих оптических модулей с помощью линейно-кусочной интерполяции меняющейся формы гирлянды - 10-20 см – в пределах допустимых значений. Но точность измерения координат самых верхних оптических модулей при больших смещениях, вызванных еще не изученными природными явлениями, может превышать 20 см. Чтобы устранить эту ошибку, в настоящее время исследуется магнитометрический способ, использующий внутримодульные инклинометры. Инклинометры в виде микрочипов устанавливаются на электронных платах оптических модулей и измеряют отклонения от вертикали с точностью до 1°. Комбинация гидроакустических и магнитометрических измерений позволяет достичь точности позиционирования оптических модулей не хуже 10 см при самых больших отклонениях гирлянд от вертикали. Данные основаны на результатах экспериментальных исследований на действующем телескопе<sup>4</sup>.

Система калибровки телескопа состоит из трех уровней: калибровка оптических

модулей на гирлянде с помощью встроенных светодиодов в каждом оптическом модуле на расстоянии 15-30 м, калибровка ОМ между гирляндами с помощью светодиодных матриц, размещаемых в специальном модуле (стеклянной сфере) на расстояниях 60-100 м, и межкластерная калибровка с помощью лазера до 200-250 м. Для межкластерной калибровки был разработан уникальный источник света на основе полупроводникового импульсного лазера и с 2017 года он устанавливается в состав телескопа – один на два кластера. Источник состоит из собственно лазерного источника света, глубоководного корпуса с герметичными разъемами, рассеивателя света и средств крепления корпуса к кабель-тросу. Источник имеет внутренний контроль параметров излучаемых импульсов и программное дистанционное управление амплитудой, временем и частотой излучаемых импульсов длительностью 1 наносекунда, обеспечивает калибровку оптических модулей на расстоянии до 200-300 м на длине волны 532 нм. Планируется устанавливать один лазерный источник на 2 кластера.

Переход в режим одновременной эксплуатации нескольких кластеров как единой установки потребовал синхронизация работы всех оптических модулей и систем телескопа с требуемой точностью. Для этого, в комплексе с триггерной системой каждого кластера, работает система межкластерной синхронизации на основе оптоволоконной глубоководной сети. Первая – Synchronization System of Baikal-GVD project (SSBG), специально разработанная НИИЯФ МГУ для данной установки; вторая система, имеющая более широкое применение, – White Rabbit Synchronization System (WR), разработанная в CERN. Результаты натурных испытаний совместной работы двух систем показали, что точность межкластерной синхронизации лучше 5 нс, что соответствует требуемой точности для телескопа Baikal-GVD, измерительная аппаратура которого работает с частотой временной дискретизации 200 МГц. Также для синхронизации с мировым временем применяется специализированный GPS-приемник сигналов точного времени. От этих систем в настоящее время идет накопление данных, осуществляется анализ их достоверности и оценка возможности использования в обработке физических событий.

Для повышения надежности и эффективности системы электропитания телескопа были испытаны и включены в режим постоянной работы новые промышленные источники питания. В настоящее время электропитание кластеров осуществляется компактными источниками с выходным напряжением до 500 Вольт и максимальным током до 10 Ампер. Помимо модернизации системы берегового электропитания установки, были проведены работы и по модернизации берегового центра сбора данных. Была создана необходимая инфраструктура для дублирования аппаратуры центра, которая позволит свести к

минимуму потери времени экспозиции, связанные с ее возможным выходом из строя.



Рис. 8.

Установка и ввод в эксплуатацию двух кластеров в год потребовала, как дальнейшего развития методов подготовки, контроля и монтажа аппаратуры установки в оз. Байкал, так и модернизации ее вспомогательных систем: электропитания, калибровки и сбора данных. Была решена принципиальная задача оптимизации процедур тестирования регистрирующей аппаратуры в процессе развертывания установки на озере Байкал. Разработаны и созданы универсальные стенды для проверки работоспособности основных узлов установки (оптических модулей и модулей управления секциями и гирляндами) в "полевых" условиях после их монтажа на несущие конструкции телескопа. Режимы тестирования аппаратуры были максимально приближены к реальному режиму эксплуатации регистрирующей системы в условиях длительной экспозиции. Ввод в эксплуатацию нового тестового оборудования позволил свести к минимуму потери времени на этапе монтажа новых кластеров и ремонта вышедших из строя ранее установленных элементов.

Для обеспечения планируемого расширения телескопа были отработаны технологии и налажено серийное производство до 1000 оптических модулей в год на производственном участке ОИЯИ (г. Дубна) по совместно разработанной технологии (рисунок 8).

Производство до 100 электронных управляющих модулей налажено на производственном участке ЛНАВЭ (ИЯИ РАН). Введены в действие системы испытательных стендов в ОИЯИ (Дубна) и в ИЯИ РАН. Производство отдельных операций и блоков по совместно отработанным технологиям было передано сторонним организациям: изготовление и сборка крейтов с электроникой центральных модулей

секций, изготовление магнитных экранов, сверление стеклянных сфер. Налажен монтаж до 300 соединительных глубоководных кабелей с глубоководными разъемами в НИИПФ ИГУ, оборудования для ведения ледовых работ, прокладки донных кабелей и крепежных рам для глубоководных модулей в НН ГТУ (Нижний Новгород). Были налажены связи и графики поставок уникальных комплектующих из-за рубежа и от отечественных производителей: стеклянных сфер высокого давления из Германии, фотоумножителей Hamamatsu из Японии, источников питания из Тайваня, оптического геля из Германии, электронных печатных плат и блоков из НИИЯФ МГУ, магнитных экранов из Рязани, гидроакустических модемов из Германии, полупроводниковых импульсных лазеров из Москвы, глубоководных электрических разъемов из США, оконечных устройств донных магистральных опто-электрических кабелей из г. Дубна.

Особое место в процессе производства конструкций телескопа занимает кабельная продукция. До 2019 года всю номенклатуру кабелей разрабатывал и поставлял завод Псковгеокабель. Но к настоящему моменту завод обанкротился и прекратил производство. Поэтому были предприняты экстраординарные меры по поиску производителей и отработки с ними технологий производства специализированных кабелей. Получены экспериментальные образцы, которые будут испытаны в составе телескопа в 2020 году.

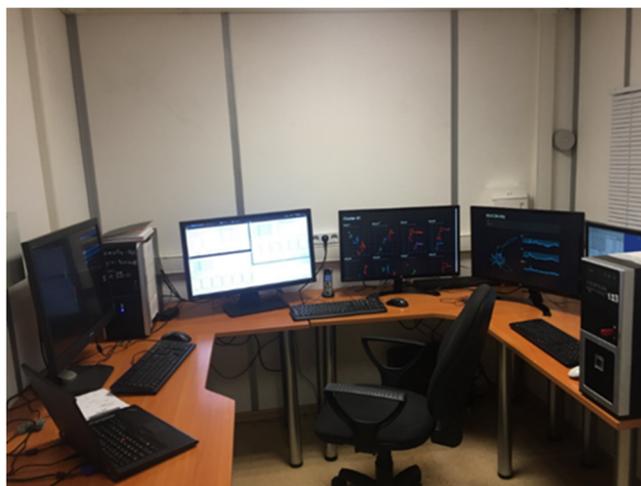


Рис. 9. Береговой центр и пульт управления телескопом

Опережающими темпами для обеспечения расширяющегося объема работ по подготовке и проведению монтажа глубоководных систем телескопа развивалась инфраструктура телескопа на берегах озера Байкал. Начиная с 2015 года при поддержке ОИЯИ (Дубна) на 106 км КБЖД был введен в эксплуатацию новый береговой центр, в который сходятся все донные кабели от кластеров телескопа (рисунок 9). Береговой центр (БЦ) рассчитан и оборудован всей необходимой техникой для бесперебойного

электропитания кластеров телескопа, сбора, первичной обработки и передачи данных по Радио-Интернет.

БЦ оборудован всем необходимым для работы и комфортабельного отдыха дежурных операторов (рисунок 10). На арендуемой у ВСЖД территории 4,6 га размещены лабораторные и бытовые помещения повышенной комфортности, предназначенные для размещения до 40 приезжающих специалистов и проведения пуско-наладочных работ во время экспедиций (рисунок 11).



Рис. 10.



Рис. 11.

Практически полностью обновлены техника и оборудование, обеспечивающая глубоководные работы в ледовом лагере и прокладку донных кабелей. Усовершенствована технология монтажа глубоководных систем телескопа, что позволило монтировать и запускать в эксплуатацию по 2 кластера в течение зимних экспедиций с 15 февраля до 15 апреля.

Ключевым объектом для обеспечения работ по расширению и эксплуатации телескопа является подразделение ИЯИ РАН «Байкальский технический стационар» (БТС), который на постоянной основе размещается в 6 зданиях разного назначения с общей площадью 3447,8 кв.м на территории 2,2 га в г. Байкальск, Промплощадка №4. БТС выполняет комплекс работ по инженерно-технической поддержке создания и эксплуатации Байкальского глубоководного нейтринного телескопа: развитие и обслуживание инженерных сетей на 106-107 км КБЖД, производство специализированных узлов несущих конструкций телескопа, транспортировка персонала, перевозки и складирование научного оборудования, поставляемого из Москвы и других городов и доставка его на место проведения монтажа новых систем телескопа во время зимних экспедиций, ремонт техники и оборудования. Ежегодно через Байкальск переправляется несколько сотен грузов всеми видами транспорта кроме авиации. В 2019 году был продолжен ремонт и оборудование помещений БТС. Отремонтировано 800 м<sup>2</sup> производственных площадей. Закуплен в рамках

национального проекта «Наука» гидравлический пресс «Геркулес 200» для производства и испытаний специальных деталей для нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Исследования и разработки в 2019 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).

### **1.3. Применение и значимость результатов исследования**

Все описанные выше разработки используются в установленных в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2019 года двух новых кластеров [1-3] и эксплуатируются в составе телескопа Baikal-GVD и будут использоваться в последующие годы в соответствии с планами по наращиванию эффективного объема телескопа.

В результате эффективный объем действующего нейтринного телескопа в озере Байкал достиг  $0,25 \text{ км}^3$ . Такой объем для глубоководных нейтринных телескопов достигнут впервые в мире. Российские ученые получили уникальную крупномасштабную установку для экспериментальных исследований в одном из самых актуальных направлений современной фундаментальной науки – астрофизики частиц высоких энергий и нейтринной астрономии. В соответствии с планами работ в 2022 году эффективный объем Baikal-GVD превзойдет эффективный объем самого большого нейтринного телескопа IceCube в льдах Антарктики –  $0,4 \text{ км}^3$ .

## **2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (Задача №2)**

### **2.1. Методология выполнения исследования**

Методология исследований и разработок заключается в выявлении новейших средств электроники, программных средств обработки больших массивов данных, разработки конкретных устройств, увеличивающих скорость сбора и передачи данных, точность калибровки, позиционирования и синхронизации систем телескопа, повышении скорости и автоматизации процессов обработки данных, разработки стандарта

представления данных для обмена с зарубежными научными коллаборациями.

## **2.2. Результаты исследований**

В части разработки программного обеспечения введены в эксплуатацию работающие «on line» программы мониторинга состояния систем телескопа, программы автоматического определения координат оптических модулей по данным гидроакустической системы позиционирования, автоматической калибровки по величине регистрируемых сигналов. Продолжены работы по расширению возможностей «off line» обработки данных пакета программ BARS, разработан блок программ по восстановлению траекторий мюонов. Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» и международной научной по программе «multi-messenger» - получено в 2019 году 26 «алертов» [4-6]. Интенсивный обмен результатами работ и данными производится на ежегодных совещаниях (MANTS) и раз в два года на расширенной конференции (VLVNT). Существенный вклад в кооперацию вносит ежемесячный электронный бюллетень, издаваемый Кристианом Шпирингом.

Параллельно с расширением телескопа разрабатывалась адекватная система управления телескопом, сбора и обработки данных. Количество поступающих с телескопа данных достигло терафлопов, что, естественно, потребовало использования самых современных методов обработки больших массивов данных. На основе уже используемых пакетов программ в мировой практике была разработана собственная, адекватная телескопу система BARS для работы с данными участников коллаборации «Байкал». С помощью системы производится первичная обработка и анализ данных с приведением их в стандартный формат, восстановление событий и моделирование работы телескопа методами Монте-Карло. Многие процессы обработки данных уже автоматизированы и ведется работа по автоматизации всех процессов первичной обработки, включая процессы калибровки и представления результатов экспериментов. Необходимые мощности вычислительных систем были предоставлены ОИЯИ (Дубна).

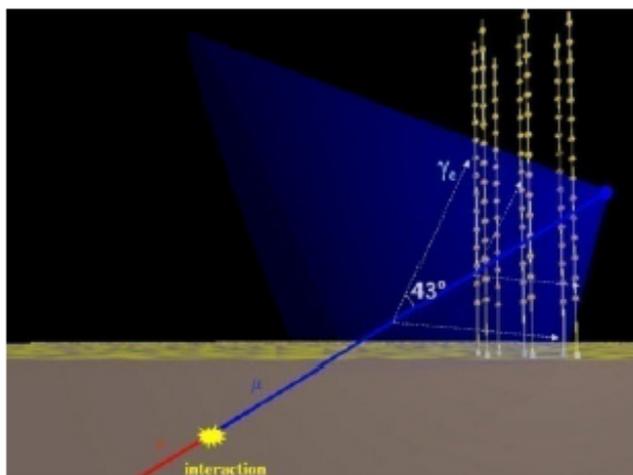


Рис. 12.

На рисунке 12 представлена одна из вероятных схем взаимодействия нейтрино со средой и зоны засветки черенковским светом оптических модулей кластера телескопа Baikal-GVD. Образование каскада может происходить как внутри, так и вне физического объема кластера, поэтому эффективный объем кластера и всего телескопа в целом существенно превышает его физический объем, что определяется свойствами байкальской воды: большими длинами поглощения и рассеяния света (20-25 м).

Эти же характеристики определяют повышенное угловое разрешения байкальского телескопа.

В таблице 1 приведены результаты обработки в 2019 году данных, накопленных за 2016, 2018 и 2019 годы. Абсолютное большинство событий связано с мюонами атмосферного происхождения, но 6 из них с энергией больше 100 TeV, вероятнее всего, имеют астрофизическое происхождения, т.е. вызваны нейтрино, которые пришли на Землю из далекого космоса.

**Таблица 1.** Количество каскадных событий, зарегистрированных кластерами телескопа Baikal-GVD по результатам обработки данных в 2016,2018 и 2019 г.

Номер кластера	Годы работы	Количество дней	Число каскадных событий
1	2016, 2018, 2019	506	1 973 014 461
2	2018, 2019	307	1 234 402 745
3	2018, 2019	368	1 798 249 449
4	2019	88	608 219 820
5	2019	95	733 408 098
Всего		1364	6 347 294 573

В таблице 2 представлены результаты обработки и выделения событий по величине энергии и только тех событий, в результате которых происходила засветка более 10 оптических модулей (ОМ), более 14 и более 19. Естественно, чем больше засвеченных ОМ,

тем с большей точностью определяются энергия и направление траектории события.

**Таблица 2.** Результаты обработки и селекции событий

	> 10TeV	> 60 TeV	> 100TeV
>10 OM	2704	547	66
>14 OM	111	36	13
>19OM	50	16	6

На рисунке 13 представлена картина распределения выявленных и восстановленных точек образования каскадов в пространстве внутри и вне пяти кластеров телескопа с  $E > 60$  TeV при засветке более 7 OM.

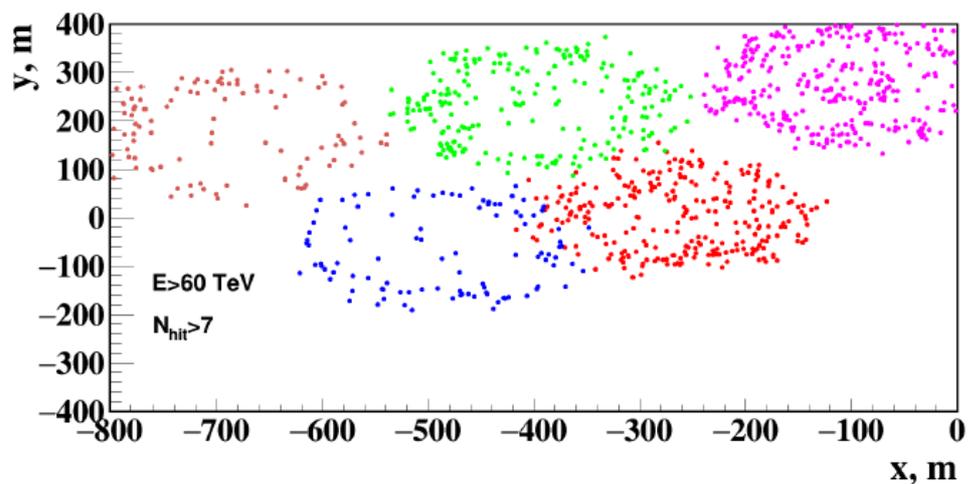


Рис. 13. Картина пространственного распределения выявленных событий

На рисунке 14 показаны точки – вершины выявленных каскадных событий с энергией больше 100 TeV и количеством засвеченных модулей более 19. Отсутствие событий в 4 и 5 кластерах объясняется недостаточным количеством обработанных данных.

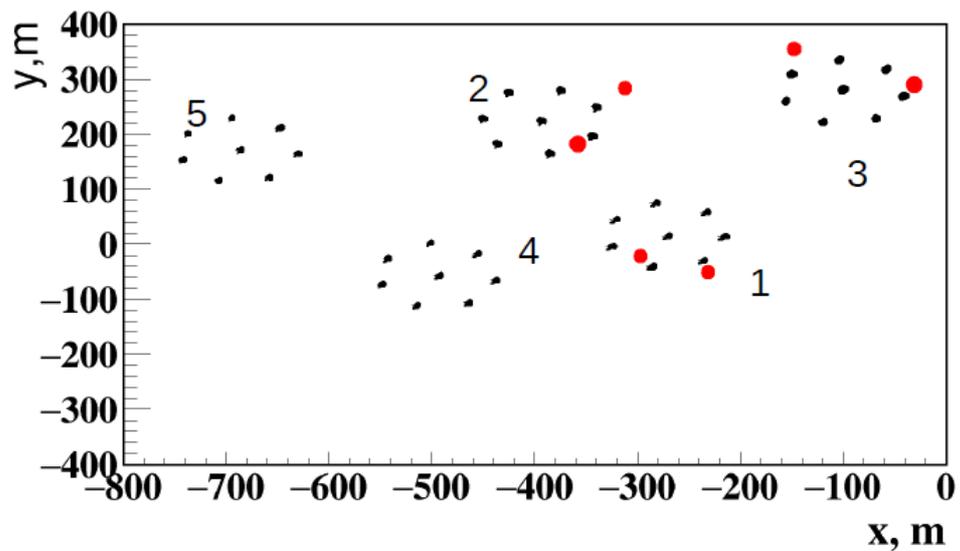


Рис. 14. Места расположения вершин 6 выявленных каскадных событий с  $E > 100 \text{ TeV}$ .

На рисунке 15 показана картина засветки оптических модулей кластера телескопа черенковским светом от каскада заряженных частиц. Каскад имеет энергию  $E=157 \text{ TeV}$  с координатами  $\theta=57^\circ$ ,  $\varphi=249^\circ$ ,  $x=-25 \text{ м}$ ,  $y=-37 \text{ м}$ ,  $z=11 \text{ м}$ ,  $\rho=44 \text{ м}$ . Слева – все засвеченные ОМ (сработавшие каналы). Справа – количество каналов после обработки данных (удаления фоновых и шумовых срабатываний каналов).

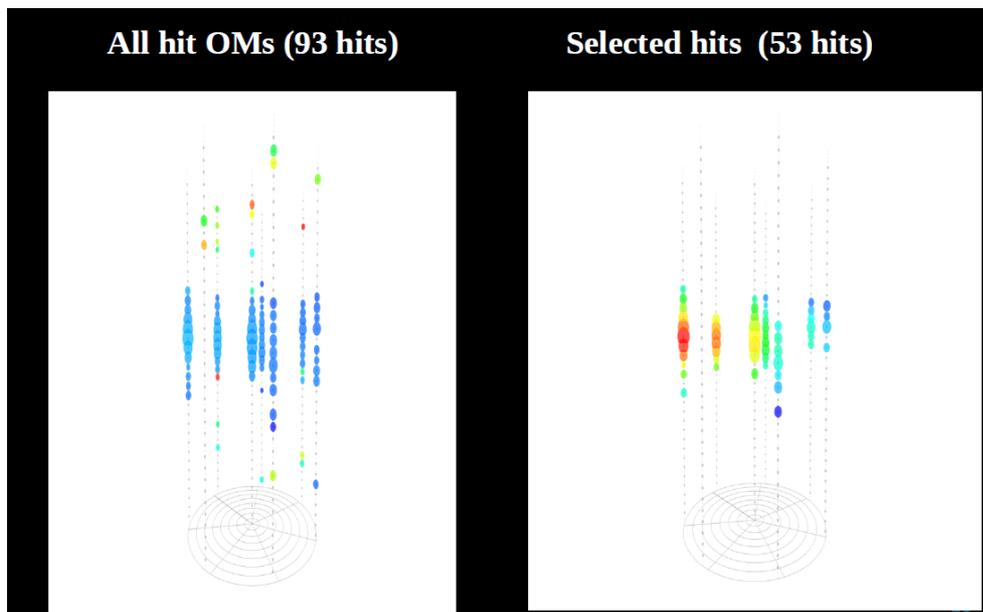


Рис. 15.

### 2.3. Применение и значимость результатов исследования

Все разработки систем и программ по задаче 2, обеспечивающие долговременный непрерывный набор данных на телескопе Baikal-GVD, уникальны и применяются на практике работы телескопа и обработки данных. В последующие годы они должны

адаптироваться к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам.

Телескоп из 5 кластеров к настоящему времени второй по объему нейтринный телескоп после IceCube, но обладает существенно лучшим угловым разрешением, чем IceCube (3-4° по сравнению с 13-14° для регистрации каскадов), поэтому получаемые уже сейчас данные по регистрации каскадов и траекторий мюонов, вызванных нейтрино высоких энергий, безусловно, входят в разряд достижений мирового уровня.

### **3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача №3)**

#### **3.1. Методология выполнения исследования**

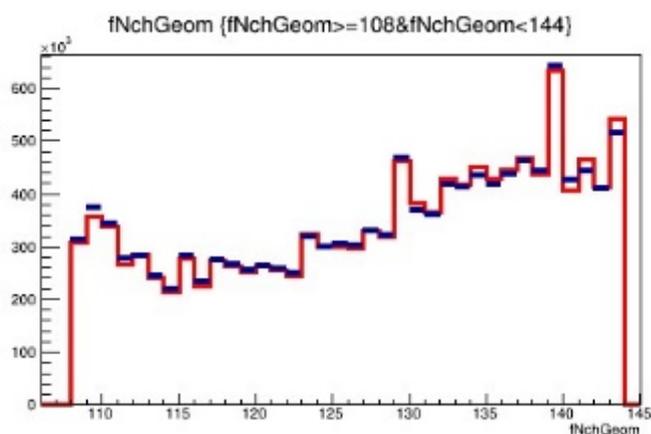
Метод исследования заключается в физическом и программном моделировании работы телескопа. Физическое моделирование осуществляется с помощью стенда, где исследуются характеристики всех электронных систем сбора и передачи данных телескопа. Программное моделирование заключается в пошаговом, на основании известных принципов, расчёте прохождения первичных частиц космических лучей до установки (с использованием пакетов CORSIKA, ANIS, MUM), определении светового поля в объёме детектора, амплитуд срабатывания оптических модулей, а затем наложении программного аналога аппаратного триггера с учётом текущей геометрии детектора, влияния шумов и параметров воды.

#### **3.2. Результаты исследований**

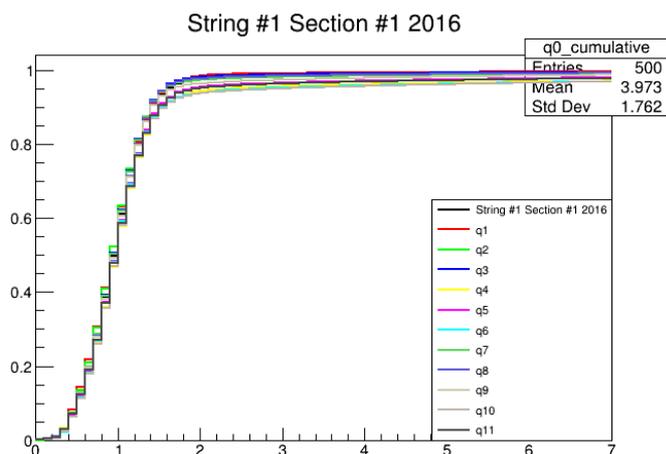
Нейтринный телескоп является сложной установкой, не все параметры которой доступны для прямых измерений. В силу этого для отработки методик выделения результатов приходится использовать модельные данные, с которыми все промежуточные шаги доступны для контроля. Эти данные получаются в результате численного моделирования процессов в установке, где исходным параметром является спектр частиц космических лучей на границе земной атмосферы, а конечным – массив записей с указанием временных привязок и амплитуд срабатывания оптических модулей телескопа, прошедших триггерный отбор. Все эти записи хранятся в формате совместимом с обработкой реальных данных, получаемых на физической установке.

В 2019 году была существенно улучшена детализация моделирования. На основании специальных методик обработки реальных данных установки стало возможным ввести в моделирование измеренные темпы шумов оптических модулей и их амплитудные распределения, зависящие от текущего насыщения байкальской воды посторонними взвесями. В пакет моделирования добавлены процедуры, корректно учитывающие

индивидуальные вариации триггерных порогов оптических модулей. Так же стало возможным моделировать события с межкластерной синхронизацией (в которых срабатывают сразу несколько кластеров) – это актуально для установки 2018 года, в которой временная синхронизация работала для 2 и 3 кластеров, и является критически важным для установки 2019 года, в которой система временной синхронизации охватывает все 5 развёрнутых кластеров. На рисунках 16 и 17 показаны результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных по каналам системы регистрации телескопа. Разница в результатах говорит о вполне удовлетворительной модели и учете условий эксперимента.



**Рис. 16.** Поканальное сравнение темпов счёта физической установки (красный) и моделирования (синий) для четвертой гирлянды кластера 2016 года.



**Рис. 17.** Кумулятивное распределение амплитуды шумовых импульсов для 1-й секции 1-й гирлянды установки 2016 года.

Для физического моделирования работы электронных систем телескопа и их долговременного испытания в лабораторных условиях был создан стенд (рисунок 18).



Рис. 18.

На стенде устанавливаются все управляющие модули одного кластера телескопа Baikal-GVD: центральные модули секций, гирлянд и кластера, на основе которых организованы системы электропитания, управления телескопом, сбора и передачи данных. Стенд работает под программным управлением с имитацией входных сигналов, моделирующих реальную обстановку при регистрации событий: форму импульсов, фон внешней среды и собственные шумы электронной аппаратуры. Частота, последовательность и форма импульсов задается цифровым генератором фирмы Rigol DG 4062 с полосой частот до 250 МГц. Управление стендом полностью автоматизировано. Анализ большого массива данных и управление работой стенда осуществляется с помощью цифрового осциллографа Осциллограф HDO4034AR-MS фирмы LeCroy с полосой частот 350 МГц, имеющего встроенный процессор с системой WINDOWS. На стенде исследуются характеристики кластеров, устанавливаются оптимальные режимы работы электронных систем, тестируются компьютерные программы, управляющие работой телескопа в натуральных условиях и испытывается на надежность каждый кластер непрерывной работой на стенде в течение месяца.

Два установленных в состав телескопа кластера Baikal-GVD в 2019 году прошли предварительные исследования и долговременные испытания на стенде.

В результате процедур компьютерного моделирования работы телескопа методом Монте Карло и анализом экспериментальных данных для конфигурации телескопа из 5 кластеров были установлены оптимальные условия для триггеров, порогов по амплитуде регистрируемых сигналов и первичных фильтров, что позволило на порядки сократить поток передаваемой информации, минимизировать потери полезных сигналов и мертвое время при регистрации и передаче сигналов от Телескопа в Береговой центр, а при дальнейшей off line обработке выделять достоверные события актов взаимодействия

мюонов с водной средой в пределах эффективного объема телескопа (каскадов (ливней) и траекторий мюонов) и иметь модельный набор событий, позволяющий контролировать достоверность методов восстановления, применяющихся к реальным данным телескопа.

### **3.3. Применение и значимость результатов исследования**

Результаты исследований были использованы при создании и эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD в 2019 году, что позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных, повысить надежность телескопа и выделять при последующем анализе и обработке события (6 событий), вызванные астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

Исследования по моделированию работы телескопа будут продолжены на весь срок создания и эксплуатации нейтринного телескопа.

## **4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача №4)**

### **4.1. Методология выполнения исследования**

Построение алгоритмов анализа и обработки, изучение и освоение наилучших практик методов анализа и обработки, создание программных приложений к системе BARS для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий.

### **4.2. Результаты исследований**

В результате исследований завершен первый этап разработки: подготовка экспериментальных данных для выделения и восстановления событий в автоматическом режиме.

В Байкальском эксперименте обработка и анализ данных осуществляется в единой программной среде BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). За обозначенный период в нее были внесены следующие усовершенствования:

- обработка данных акустической системы позиционирования происходит автоматически с точностью измерения положения оптических модулей порядка 20 см;
- запущена автоматическая система обработки данных, позволяющая получать готовые однокластерные события с задержкой менее чем 24 часа относительно момента возникновения реального физического события;
- разработано крупное обновление системы обработки данных телескопа, способное получать физический результат с задержкой менее чем 30 мин относительно момента возникновения реального физического события. Значительной модернизации подверглись

основные узлы системы как, например, база данных, содержащая статус работы системы и основные характеристики детектора и его подсистем;

- разработана методика восстановления мюонных треков в телескопе с угловым разрешением порядка 1 градуса;

- разработана методика подавления шумовых сигналов, происходящих преимущественно от свечения озера, исключая их на уровне 96% и при этом оставляющая сигнал на уровне 94%;

- в стадии глубокой проработки находится методика создания, так называемых, мультикластерных событий, которая позволит выделять и формировать события, произошедшие на двух и более кластерах одновременно;

- внедрены временные метки в каждое событие, полученные системой синхронизации времени – ССБТ (разработка НИИЯФ МГУ) и системы синхронизации White Rabbit (разработка CERN). Показания часов в двух системах синхронизированы с мировым временем и имеют временное разрешение 1 нс (White Rabbit) и 10 нс (ССБТ);

- разработана методика анализа сеансов набора данных с включенным мощным лазерным калибровочным источником света, которая позволила измерять длину поглощения байкальской воды с точностью порядка 0.3 м;

- временная калибровка детектора осуществляется автоматически несколькими разработанными методами, согласие между которыми находится на уровне 5 нс;

- разработана методика мониторинга качества данных, проверяющая поток событий на соответствие распределению Пуассона. Отклонения от ожидаемого темпа счета событий фиксируются и используются для дальнейшего анализа. В частности, методика способна обнаруживать периоды, в течение которых имеется несанкционированное свечение искусственных источников света, таких как, например, светодиоды ОМ, и фильтровать их;

- разработана методика анализа сложной формы импульсов ФЭУ, позволяющая разделить импульсы, отстоящие друг от друга на время, более чем 25 нс;

- для удобства работы введен унифицированный формат событий телескопа, позволяющий сохранять в нем как экспериментальные, так и модельные данные.

#### **4.3. Применение и значимость результатов исследования**

С использованием разработанных алгоритмов и программ и разработанными методами выделения нейтринных событий были получены первые наборы событий - кандидатов, имеющих происхождение от атмосферного потока нейтрино.

Для выделения событий от мюонных нейтрино из-под горизонта был использован предварительный метод восстановления трековых событий в телескопе, а также

разработаны параметрический и непараметрический наборы критериев выделения качественно восстановленных сигнальных событий от фоновых.

В результате применения методики и критериев качества к данным 2019 года с суммарной экспозицией на кластер 329 дней набора данных были выделено 51 событие непараметрическим набором критериев и 39 событий параметрическим набором критериев

Зенитное распределение выделенных событий согласуется по форме с ожиданием от потока атмосферных нейтрино. Фон от потока атмосферных мюонов подавлен практически полностью.

Также было проанализировано 298 дней набора статистики в 2018 году и выделено 8 событий непараметрическим набором критериев и 6 событий параметрическим набором критериев как кандидатов на нейтрино высоких энергий астрофизической природы происхождения.

## **5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий (Задача №5)**

### **5.1. Методология выполнения исследования**

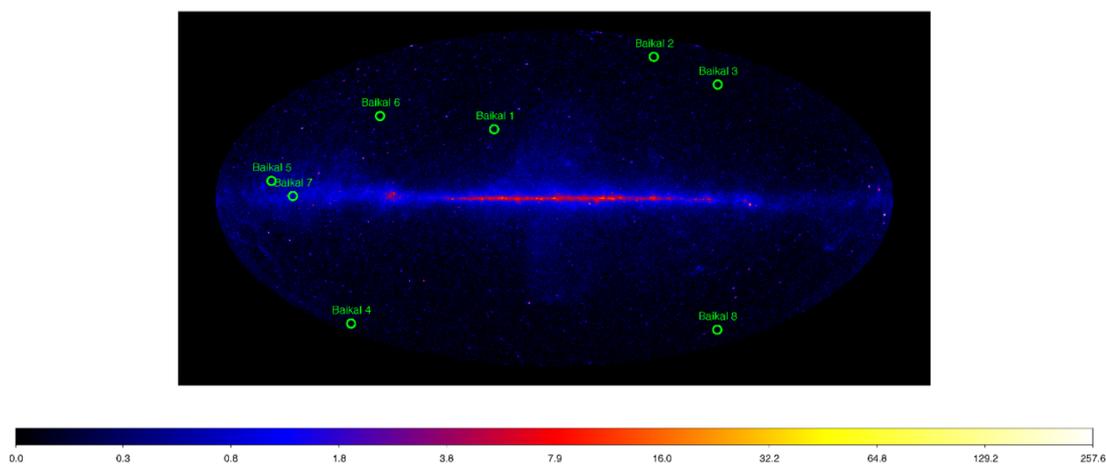
Метод исследований – многолетнее накопление и обработка данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, определение энергий и направлений прихода астрофизических нейтрино, использование информации, полученной другими научными группами и другими устройствами измерений.

### **5.2. Результаты исследований**

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 встала задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. В 2019 году коллаборация «Байкал» вплотную подошла к решению этой задачи. Телескоп Baikal-GVD достиг соизмеримого с IceCube эффективного объема и началась регистрация и накопление

данных астрофизических нейтрино высоких энергий, а следовательно и накопление данных для поиска источников нейтрино высоких энергий и решения задач нейтринной астрономии.

В 2019 году выполнен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, накопленных в 2016, 2018 и в первой половине 2019 года. Общий объем данных, включенных в анализ, составил 6 347 294 573 событий, что соответствует 1364 дням (3,7 года) эффективного набора данных одним кластером нейтринного телескопа Baikal-GVD. В результате обработки и анализа данных был сформирован банк экспериментальных данных, содержащий 2704 события, который удовлетворяет критериям отбора каскадов с энергией выше 10 ТэВ и множественностью числа сработавших оптических детекторов телескопа - более десяти. После восстановления энергии и направления отобранных событий получено распределение возможных источников этих событий на небесной сфере. Выделенный набор данных используется для поиска галактических и внегалактических локальных источников нейтрино. В результате МК-моделирования отклика байкальского нейтринного телескопа на каскадные события от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, зарегистрированного в эксперименте IceCube, были выработаны более строгие критерии отбора каскадных событий от таких нейтрино, в частности, множественность числа сработавших оптических детекторов телескопа должна быть больше или равна двадцати, а восстановленная энергия каскада выше 100 ТэВ. Ожидаемая частота регистрации астрофизических нейтрино с использованием этих критериев отбора составляет 0,6 событий в год в одном кластере телескопа. Применение дополнительных критериев отбора к набору экспериментальных данных позволило выделить шесть событий – первых кандидатов на роль нейтрино астрофизической природы, зарегистрированных в экспериментах на нейтринных телескопах, расположенных в Северном полушарии. На рисунке 19 показано местоположение возможных источников этих нейтрино на небесной сфере в Галактической системе координат.



**Рис. 19.** *Расположение на небесной сфере источников излучения кандидатов на роль астрофизических нейтрино*

События 2-6 зарегистрированы в 2016, 2018 и 2019 годах. Событие 1 выделено из данных 2015 года, событие 8 выделено в 2019 году и восстановлено как каскад с энергией 71 ТэВ из-под горизонта. Также на рисунке показаны источники гамма-излучения в Галактической плоскости.

Модульная структура нейтринного телескопа Baikal-GVD, состоящего из функционально независимых установок с детектирующим объемом в несколько мегатонн – кластеров оптических модулей, позволяет вести исследования нейтринных потоков различной природы уже на ранних стадиях создания телескопа. В течение 2016-2019 годов детектирующий объем телескопа достиг значения в  $0,25 \text{ км}^3$ , что позволило приступить к решению задач в рамках программ «multi-messenger» - исследований астрофизических объектов и процессов, протекающих в них. Существенным событием 2019 года является начало сотрудничества коллаборации Baikal-GVD с коллаборациями участниками международной научной программы «multi-messenger» и обмен данными о регистрации астрофизических событий другими установками в реальном времени. По триггеру нейтринного телескопа ANTARES в 2019 году было получено 26 таких сообщений («алертов») с оценкой энергии нейтрино выше десятков тераэлектронвольт и определением его направления в звездных координатах с точностью меньше градуса. Пространственно-временная информация алерта сопоставлялась нами с данными Baikal-GVD. События нейтринного телескопа анализировались за первые сутки относительно алерта и затем по всему набору данных каждого кластера Baikal-GVD. В результате выполненного анализа данных не были выявлены нейтринные события, совпадающие по времени и направлению

с алертами эксперимента ANTARES.

### **5.3. Применение и значимость результатов исследования**

В целом 2019 год стал прорывным в достижении целей задачи 5. Подтверждена высокая эффективность нейтринного телескопа Baikal-GVD, как инструмента исследования процессов, протекающих как во Вселенной в целом, так и в астрофизических объектах методом регистрации нейтрино высоких энергий. Зарегистрированы первые кандидаты на роль нейтрино астрофизической природы, число которых не противоречит данным нейтринного телескопа IceCube. Байкальский нейтринный телескоп в конфигурации 2019 года является новым экспериментальным комплексом способным предоставить уникальную информацию в рамках multimessenger-исследований в тесном взаимодействии с детекторами электромагнитного излучения и с гравитационными антеннами.

## **6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача №6)**

### **6.1. Методология выполнения исследования**

Анализ и обработка накопленных за годы данных для выявления избыточных потоков нейтрино прогнозируемого спектра энергий и направлений.

### **6.2. Результаты исследований**

В 2019 году продолжен анализ данных в рамках поиска проявлений темной материи в структуре потоков нейтрино высоких энергий, регистрируемых кластерами телескопа Baikal-GVD. В ранее опубликованных работах была изложена методика исследований и результаты, полученные с помощью первых модификации байкальского нейтринного телескопа NT-200. К настоящему времени в каскадной моде реконструкции событий обработаны данные кластеров телескопа Baikal-GVD за 2016 год (один кластер), частично 2017 (два), 2018 (три) и 2019 (пять) годы. Тем самым сформирована начальная база данных для статистического анализа выбранных направлений на предполагаемые астрофизические объекты, как источники аннигиляций частиц темной материи, в заданных энергетических интервалах, соответствующих различным массам темной частицы. Стандартными источниками рассматриваются центр Галактики, темные сфероидальные карликовые галактики, Солнце и ядро Земли. До готовых к публикации результатов в 2019 году, в продолжение ранее опубликованных работ на телескопе меньшего объема, исследование не доведено, требуя дальнейшего изучения фона, в плане набора большей статистики данных

и времени наблюдения, и более подробной симуляции сигнала компьютерными средствами.

### **6.3. Применение и значимость результатов исследования**

Продвижение в решении фундаментальной физической проблемы существования темной материи с помощью анализа и обработки данных телескопа Baikal-GVD вызывает несомненный интерес и цитирование выводов научной общественностью. Накопленный объем данных является важным вкладом в дело поиска проявлений процессов, связанных с присутствием темного вещества в астрофизических источниках, но потребуются еще достаточно много времени (годы), чтобы получить окончательный ответ.

С дальнейшим увеличением эффективного объема телескопа Baikal-GVD до размера кубокилометра и при существенном увеличении скорости обработки данных перспективы получения значимых результатов в поиске сигнала от аннигиляции массивных слабовазаимодействующих частиц темной материи с каждым годом возрастают.

Исследования по моделированию работы телескопа будут продолжены на весь срок создания и эксплуатации нейтринного телескопа.

## **7. Первый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) (Задача № 7)**

В рамках эксперимента BEST по поиску на коротких расстояниях переходов электронных нейтрино в стерильные состояния в период с 5 июля, дата доставки источника в подземную лабораторию галлий-германиевого нейтринного телескопа, по 13 октября 2019 года было проведено 10 экспозиций двухзонной галлиевой мишени, разделенной на две (внутреннюю и внешнюю) зоны (Рис. 20), искусственным источником нейтрино  $^{51}\text{Cr}$ . После каждой экспозиции атомы  $^{71}\text{Ge}$ , образованные в реакции захвата нейтрино на ядрах  $^{71}\text{Ga}$ , в течение суток извлекались из каждой зоны мишени и помещались в специальные низкофоновые счетчики, устанавливаемые на счет в специально изготовленные счетные системы. Все извлечения установлены в счетные системы на продолжительные измерения, которые на данный момент продолжаются.

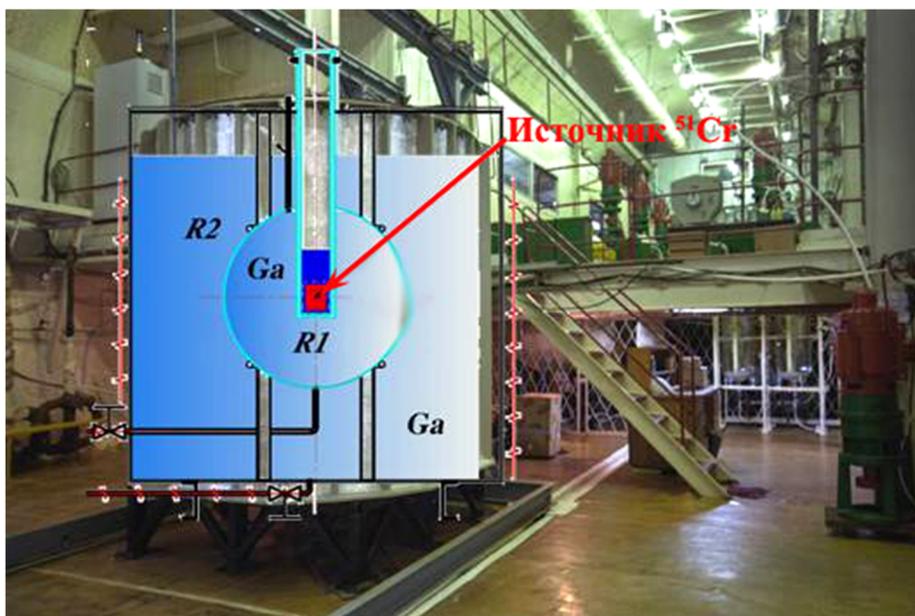


Рис. 20. Размещение источника в двухзонной галлиевой мишени.

### 7.1. Измерение активности искусственного источника

Для интерпретации результатов эксперимента BEST важно знать величину активности источника с высокой точностью. В связи с этим нами разработаны и созданы спектрометрическая и калориметрическая системы для измерения с высокой точностью активности высокоинтенсивных гама источников. В период проведения извлечения атомов  $^{71}\text{Ge}$  из облученного галлия с точностью лучше 1%. На Рис. 21 представлены результаты калориметрические измерений активности искусственного источника  $^{51}\text{Cr}$ .

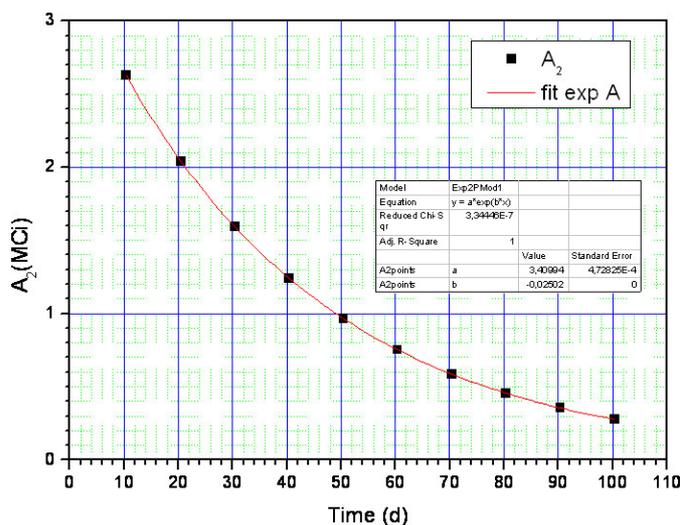


Рис. 21. Результаты калориметрических измерений активности искусственного источника  $^{51}\text{Cr}$ .

В результате 10 калориметрических измерений была получена величина активности

нейтринного источника, которая на момент начала измерений в БНО ИЯИ РАН составила **3,41± 0,02 МКи**. В мире впервые изготовлен искусственный источник нейтрино такой высокой интенсивности и впервые достигнута такая высокая точность в измерении такой активности.

Из спектрометрических измерений гамма излучения источника на данном этапе определены радиоактивные примеси и их активности в источнике (Таблица 3).

**Таблица 3.** Радионуклидный состав источника  $^{51}\text{Cr}$ .

	Изотоп	Энергия в линии, кэВ	Выход линии, %	$n_s$	$n_f$	Активность на 5.07.2019, мКи	W, мВт
1	$^{137}\text{Cs}$	662	85	462	345	$17 \times (1 \pm 0.10)$	0.12
2	$^{95}\text{Zr}$	724	11.1	442	206	$74 \times (1 \pm 0.07)$	2.1
		757	54.38	461	215		
3	$^{95}\text{Ni}$	766	99.8	1392	184	$92 \times (1 \pm 0.04)$	
4	$^{134}\text{Cs}$	796	85.5	345	162	$5.2 \times (1 \pm 0.10)$	0.064
5	$^{58}\text{Co}$	811	99.44	298	155	$12 \times (1 \pm 0.11)$	0.16
6	$^{54}\text{Mn}$	835	100	1085	138	$15 \times (1 \pm 0.06)$	0.12
7	$^{46}\text{Sc}$	889	100	382	152	$7.7 \times (1 \pm 0.10)$	0.11
		1120	100	458	102		
8	$^{59}\text{Fe}$	1099	57	449	117	$22 \times (1 \pm 0.09)$	0.21
		1291	43.2	299	74		
9	$^{60}\text{Co}$	1173	100	1790	146	$12 \times (1 \pm 0.05)$	0.10
		1332	100	1645	359		
10	$^{124}\text{Sb}$	1690	47.5	201	77	$4.3 \times (1 \pm 0.12)$	0.074
		2091	5.5	48	2		
11	$^{22}\text{Na}$	1274	99.9	93	35	$0.3 \times (1 \pm 0.29)$	0.005
12	$^{154}\text{Eu}(?)$	1595	1.8	10	7	$1 \times (1 \pm 1.86)$	0.012
$\Sigma$							<b>3.0</b>

Доля радиоактивных примесей в тепловыделении источника  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3.0 МКи с тепловыделением около 650 Вт составляет порядка  $5 \times 10^{-6}$ . Суммарное тепловыделение примесных радиоактивных элементов в источнике составляет **3.0 ± 0.5 мВт**.

Сейчас в эксперименте проходит второй этап, в счетных системах продолжается регистрация распадов извлеченных атомов  $^{71}\text{Ge}$ , ведется обработка полученных данных. Принимая во внимание необходимую длительность измерений фона каждого поставленного на счет счетчика и время на выполнение прямых измерений эффективности каждого счетчика, первые результаты эксперимента планируются получить в середине года.

## **8. Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора (Задача № 8)**

В качестве Нового большого сцинтилляционного жидкостного детектора (в частности, Нового баксанского нейтринного телескопа) для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников были рассмотрены детекторы двух типов в зависимости от цели. Если требуется определить количество урана и тория в Земле вместе с местами наибольшего их содержания (кора, мантия, ядро), то в качестве детектора геонейтринно 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. При определении содержания калия ( $^{40}\text{K}$ ) можно использовать относительно небольшой детектор 300-500 т. типа детектора Bogerino. Однако фон от в таком детекторе должен быть дополнительно понижен по сравнению с фоном, достигнутым детектором Bogerino. Это относится в первую очередь к фону от внутренней оболочки детектора, к фону от висмута и от изотопа  $^{11}\text{C}$ , возникающего от взаимодействия космических мюонов с атомными ядрами сцинтиллятора.

Для обнаружения потока калиевых геонейтринно необходимо знать величину потока CNO солнечных нейтринно, события от которых накладываются на спектр от калиевых геонейтринно. Чтобы разделить события от этих источников желательно иметь независимое измерение CNO нейтринно, которое может быть выполнено при помощи специального детектора на базе индия. Аналогичный детектор разрабатывался в 1990-2000х годах Р.Рагаваном.

На БНО ИЯИ РАН создается малоформатная установка для измерения концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$  в жидких углеводородах, которые являются основой для низкофоновых сцинтилляторов. Проведены первые тестовые измерения. Проведены измерения концентрации  $^{14}\text{C}$  для ряда растворителей, в том числе 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  $(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-16}$  ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ).

Проводятся работы по модернизации детектора. Закуплены комплектующие для создания системы дистанционного залива/слива сцинтиллятора и барботирования азотом.

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. Модель фона для детектора включает 8 компонент и учитывает, что фон естественной радиоактивности не находится в равновесии продуктов распада в цепочках. На рис. 22 показано измерение за 322.9 часа. Модель фонов очень хорошо описывает представленное измерение.

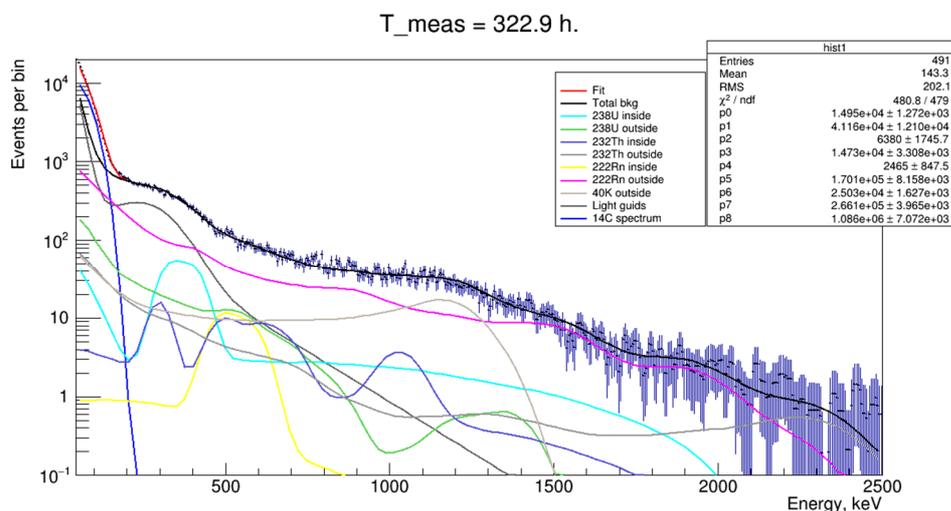


Рис. 22. Рисунок 1 - Измерения образца сцинтиллятора на основе ЛАБ китайского производства за 322.9 часа. Точки с погрешностью – эксперимент. Показаны вклады от фонов детектора.

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). Для ядер урана получается концентрация равная  $2.2 \times 10^{-13}$  г/г, для тория -  $1.3 \times 10^{-13}$  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 выработывалась 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.

Произведённый анализ полученных данных малоформатной установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора выявил необходимость её модернизации с целью повышения чувствительности. Разработаны мероприятия по её модернизации.

## 9. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD (Задача № 9)

### 9.1. Анализ данных детекторов LVD и АСД

Основная цель экспериментов LVD и АСД – поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года, АСД – с 1977 года.

Детектор LVD (Large Volume Detector) [12], расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине  $\langle H \rangle = 3650$  м.в.э., состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами  $100 \times 100 \times 150$  см<sup>3</sup>, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита  $C_nH_{2n}$ ,  $n = 9.6$ . Они размещены по 8 штук в стальных несущих модулях, которые сгруппированы в 7 горизонтальных слоёв и образуют вертикальные колонны. Детектор LVD состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой. Масса железа и сцинтиллятора в установке по 1 кт. Эффективность детектора LVD при обнаружении сверхновых составляет более 95% для расстояний менее 25 кпк, когда активная масса детектора превышает 300 т (Рис. 23).

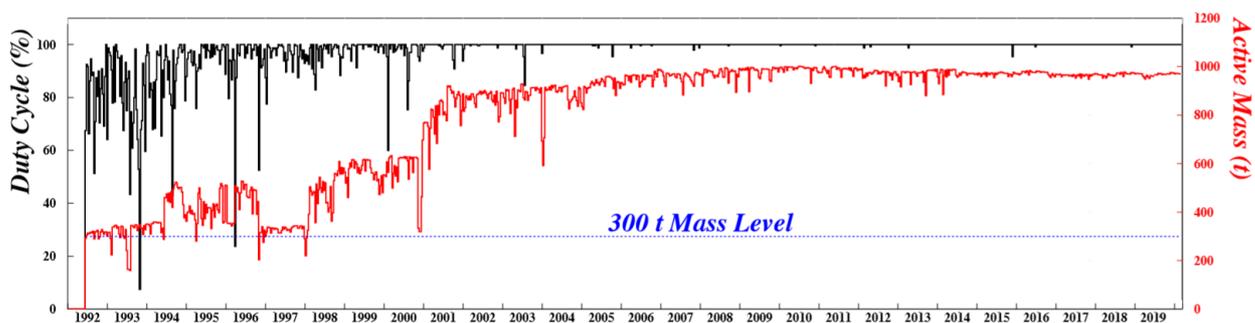


Рис. 23. Рабочее время LVD (черная кривая) и активная масса (красная) как функция времени с 1992 по 2019 гг.

Детектор АСД Артемовский Сцинтилляционный Детектор [13] - расположен в соляной шахте на глубине 570 м в.э. Масса мишени детектора равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам окружающей детектор соли (NaCl). Детектор имеет

цилиндрическую форму, диаметр  $(556 \pm 3)$  см, высота 547 см. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность – 0.78 г/см<sup>3</sup>.

Установки LVD и АСД способны регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом. По методам, разработанным в ИЯИ РАН, ведется поиск нейтрино в «он-лайн» и «офф-лайн» режимах. Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме он-лайн осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20$  секунд с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4$  МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме он-лайн посылаются в систему SNEWS [14]. LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме он-лайн с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось. Детектор АСД еще не оснащен такой же системой для выработки сигнала для SNEWS.

Поиск кластеров нейтринных событий офф-лайн осуществляется как для LVD, так и для АСД. В течение временного окна с длительностью  $\Delta t$  до 100 с шагом 100 мс анализируются кластер с характерным  $\Delta t$  и количеством событий внутри  $\Delta t$ . Для каждого кластера, определяется частота имитации  $F_{im}$ . За период с 1992 по 2019 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее  $1/100$  г<sup>-1</sup>. По данным работы нейтринного телескопа LVD за 27 лет работы, получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 11.7 г. на 90% уровне достоверности. За 42 год работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 18.2 года на 90% доверительном уровне ( $f_{col} < 0.055$  года<sup>-1</sup>). Живое время работы детектора на сегодняшний день составляет 80%. За 42 год наблюдений за нашей галактикой антинейтринных вспышек обнаружено не было.

## 9.2. Анализ данных детектора БПСТ

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2019 году (с 01.01 по 29.12) составило 8265 часов (94.9% календарного времени).

За 2019 был отремонтировано 61 сцинтилляционный счетчик, настроены пороги дискриминаторов и коэффициенты усиления у 96 счетчиков, заменен 1 ФЭУ. Было сделано контрольное измерение коэффициентов усиления ФЭУ (с подстройкой в случае необходимости) у 400 счетчиков. Измерение показало, с учетом периода полураспада радиоактивного источника <sup>137</sup>Cs, который используется при настройке, высокую степень

стабильности коэффициентов усиления. Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе проверка работоспособности одного из сумматоров сотни для 5-й плоскости ПСТ и его ремонт, ремонты годоскопа импульсных каналов (ГИК) и годоскопа амплитудных каналов (ГАК), ремонт многоканальной измерительной системы (МИС).

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2019 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7817 часа, было зарегистрировано 53 мюонных нейтрино из нижней полусферы.

Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года по 31.12.2019 составляет 292445 часов (33.3 года, 81.4 % от календарного). Всего за это время было зарегистрировано 1757 нейтрино. На рисунках 24 и 25 приведены распределения зарегистрированных нейтринных событий по склонению и по галактической широте.

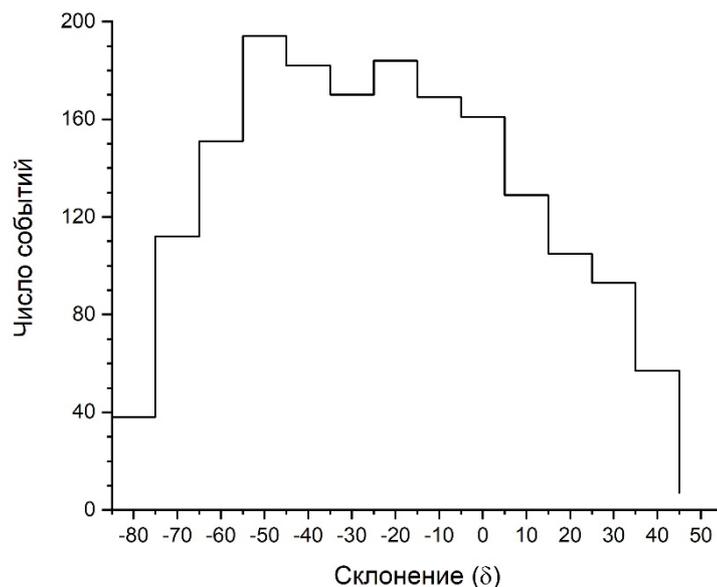


Рис. 24. *Распределение всех зарегистрированных на БПСТ мюонных нейтрино из нижней полусферы по склонению.*

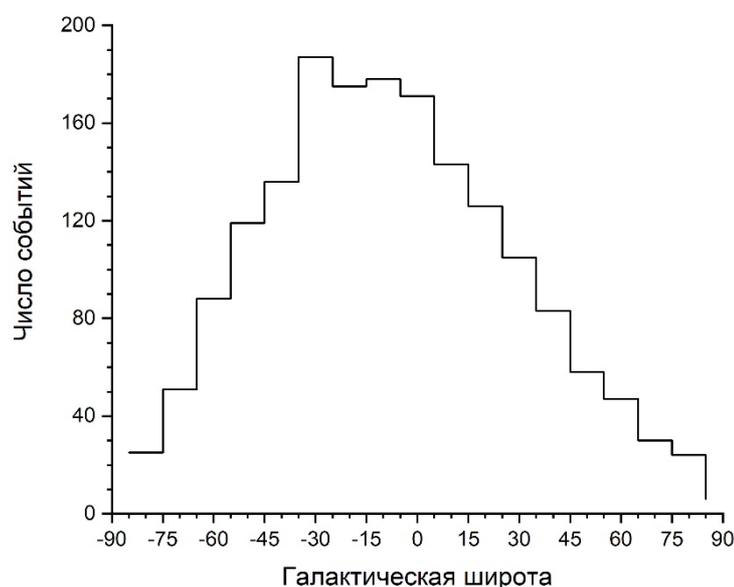


Рис. 25. *Распределение всех зарегистрированных на БПСТ мюонных нейтрино из нижней полусферы по галактической широте.*

Проведен поиск мюонных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 1 ГэВ в совпадении с гравитационно-волновым событием GW170817. Это событие, зарегистрированное 17 августа 2017 года обсерваториями Advanced LIGO и Advanced Virgo, является первым зарегистрированным событием такого типа от слияния нейтронных

звезд в двойной системе. Короткий гамма-всплеск GRB 170817A от этого события свидетельствует об ускорении частиц в источнике. Точное положение источника было определено с помощью регистрации последующего сигнала в оптическом диапазоне. На рис. 26 обозначено положение события GW170817 в локальной системе координат (H, Az), где H – угол возвышения над горизонтом, Az – азимутальный угол, отсчитываемый от направления на юг, и приведена траектория источника в течение первых суток после регистрации гравитационно-волнового события. В течение  $\approx 9$  часов в сутки источник находится над горизонтом, минимальная толщина вещества для этих направлений составляет  $\approx 10^6$  г/см<sup>2</sup>. Для грунта в расположении телескопа данная толщина соответствует пробегу мюонов с энергией  $\approx 10^5$  ГэВ. Поиск мюонных нейтрино от GW170817 проводился в круге радиусом  $5.0^\circ$ . Для временного интервала  $\pm 500$  с относительно слияния не было зарегистрировано ни одного события, что находится в согласии с ожидаемым числом фоновых событий от мюонов космических лучей. В течение последующих после GW170817 14-и суток из области нахождения источника было зарегистрировано 3 мюонных события, что также находится в согласии с ожидаемым числом фоновых событий (2.6) от мюонов космических лучей. Все зарегистрированные события пришли из верхней полусферы при углах возвышения от  $6^\circ$  до  $23^\circ$ .

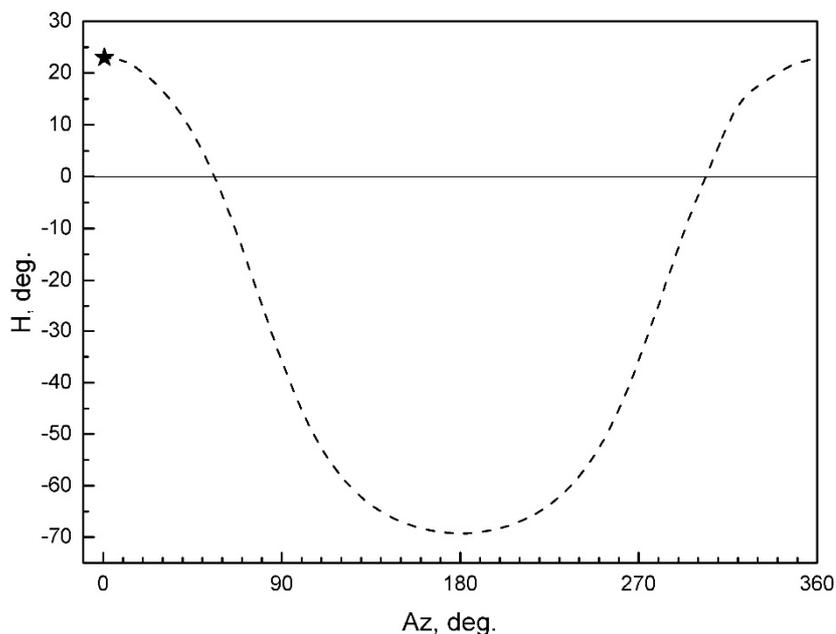


Рис. 26. Положение события GW170817 (звездочка) и траектория источника в локальной системе координат ( $H, Az$ ) в течение первых суток после регистрации.

Из факта отсутствия нейтринных сигналов от источника в интервале  $\pm 500$  с были поставлены верхние пределы (на 90% доверительном уровне) на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино, в зависимости от их энергии, для моноэнергетического спектра. В предположении степенного спектра с показателем  $-2$  получены верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от GW170817 для диапазона энергий  $1 \text{ ГэВ} - 10^5 \text{ ГэВ}$  (рис. 27).

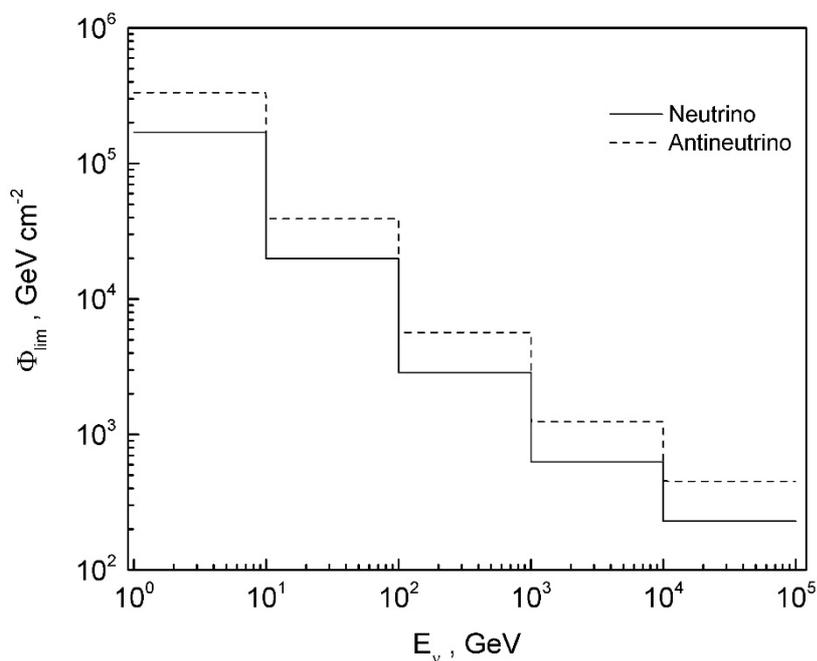


Рис. 27. Верхние пределы на потоки энергии от GW170817 во временном интервале  $\pm 500$  с.

По информации БПСТ за 2019 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, чистое время набора по этой задаче составило 343.6 суток – 94.1 % от календарного времени за период с 01 января 2019 по 31 декабря 2019 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  $\approx 15 \text{ МэВ}$ , то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия (кластер) 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. В настоящее время для поиска нейтринной вспышки, кроме 1200 сцинтилляционных счетчиков внутренних плоскостей (детектор Д1), также используются 1030 сцинтилляционных счетчиков на внешних плоскостях (детектор Д2). Совместная работа детекторов Д1 и Д2 позволяет уменьшить порог по числу событий в кластерах в Д1 и, следовательно, увеличить радиус чувствительности БПСТ при поиске событий от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра.

Проведена обработка всей набранной в 2019 году информации, обработано 488499111 события. Из этих событий отобраны одиночные события для двух детекторов Д1 и Д2 – 576275 событий для Д1, 3410189 для Д2. При обработке в обязательном порядке проверяется предыстория каждого одиночного события в Д1, для поиска возможной генетической связи последующих одиночных событий с предшествующим каскадом. В 2019 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности  $m \geq 5$ , то есть ложный алерт для регистрации вспышки Сверхновой по этой причине исключен. В целом, критерии отбора событий позволяют контролировать работу установки и избегать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звезд по экспериментальным данным 2019 года не было обнаружено.

На рис. 28 показаны экспериментальные и расчетные распределения фоновых событий по множественности в детекторе Д2, при фиксированной множественности кластера в Д1 –  $m_1=4$ ,  $m_1=5$ . В детекторе Д1 скользящее временное окно равно 20 секундам, в Д2 – фиксированное окно 10 секунд (данные за 2001 – 2019 годы, чистое время 15.5 лет).

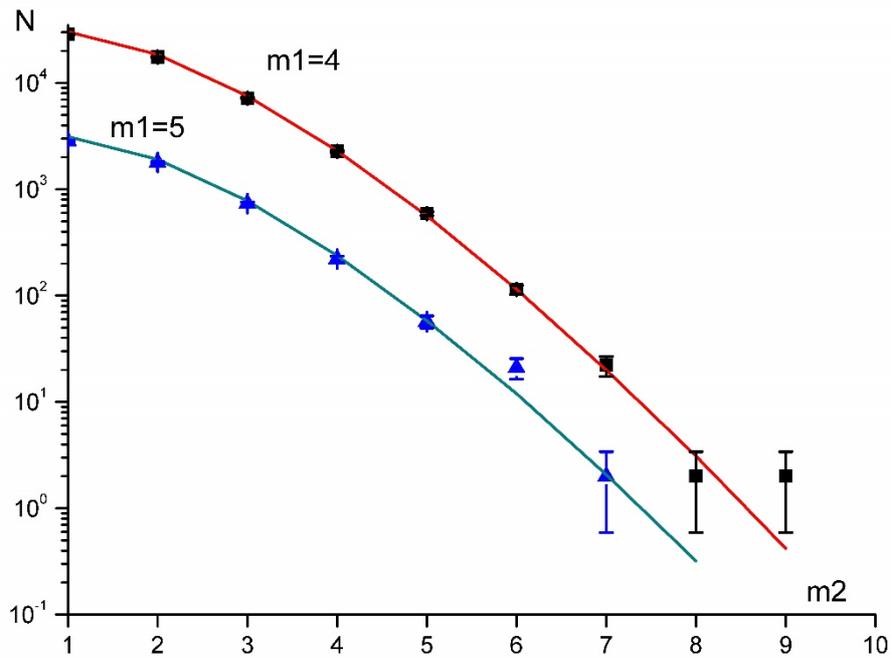


Рис. 28. Распределение кластеров по множественности  $m_2$ , при фиксированной множественности кластеров в Д1  $m_1=4$ ,  $m_1=5$ , по данным за 2001 – 2019 годы.

На рис. 29 показаны распределения фоновых событий по множественности  $m_1$  (для детектора Д1) в скользящем временном окне, равном 20 секундам и 10 секундам. Использовался тот же набор данных за 2001-2019 годы.

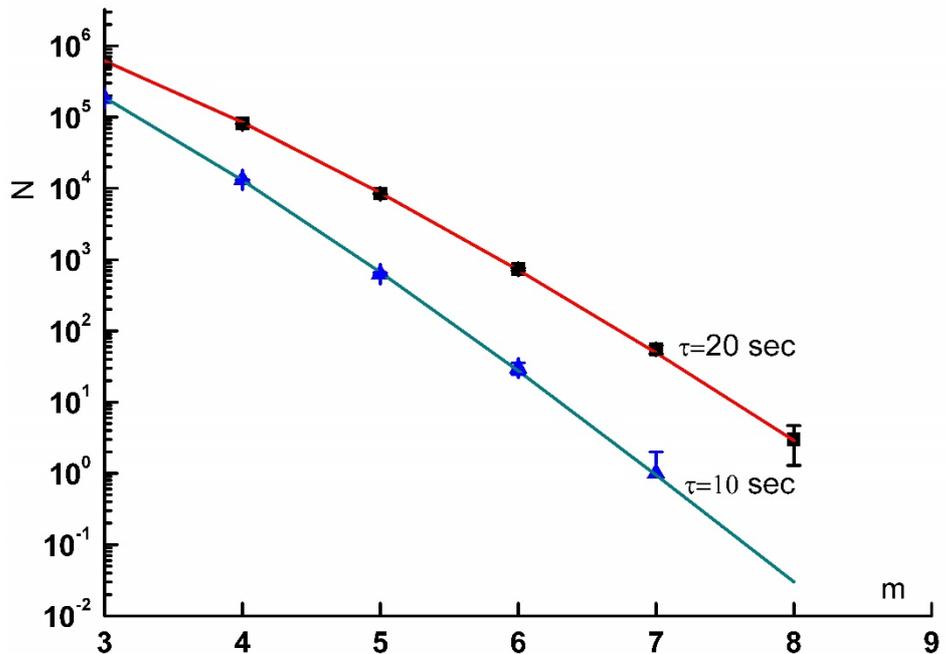


Рис. 29. *Распределение кластеров по множественности  $m$ , 2001- 2019 год,  $dt=20$  сек и 10 сек*

Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2019 года составляет 33.95 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90% доверительном уровне по данным БПСТ составляет  $0.0678 \text{ год}^{-1}$ .

### **9.3. Поиск совпадений в детекторах БПСТ и LVD во время гравитационного сигнала от источника GW170817**

Экспериментальное подтверждение существования гравитационных волн побудило различные научные группы, занимающиеся исследованиями в области нейтринной астрофизики, более пристально исследовать данные по детектированию нейтринного излучения в окрестности времени регистрации гравитационных волн. Поиск различных типов нейтрино от гравитационно-волнового события GW170817 [15], зафиксированный 17 августа 2017 года в 12:41:04 UTC был проведен в широком диапазоне энергий (от 0.5 МэВ до  $\sim 2.5 \times 10^{10}$  ГэВ) на нейтринных телескопах ANTARES, БПСТ и IceCube, ливневой установке Pierre Auger, детекторах Borexino, SuperKamiokande [20]. Анализ данных показал отсутствие статистически значимых результатов, свидетельствующих о регистрации нейтрино.

Поскольку заранее неизвестно, какие импульсы в детекторе являются следствием взаимодействия нейтрино (антинейтрино) с веществом детектора, а какие импульсы являются фоном, то метод поиска нейтринной вспышки базируется на поиске редкой комбинации импульсов. Такой комбинацией является серия импульсов с малой частотой образования фоном (статистически значимое событие). Средняя частота образования серии фоном рассчитывается исходя из средней скорости счёта импульсов в детекторе. В случае достаточной интенсивности потока нейтринного излучения, кластеры импульсов будут зарегистрированы одновременно во всех детекторах нейтрино. Однако по мере удаления источника нейтринного излучения, вероятность регистрации детектором статистически значимого события уменьшается. Одновременная регистрация совпадений одиночных импульсов в двух и более детекторах может являться следствием взаимодействия в них нейтрино от одного источника. Подобный анализ проводился после регистрации нейтринного излучения от SN1987A, в ходе которого было обнаружено превышение совпадений одиночных импульсов в детекторах LSD и БПСТ [22, 23]. Превышение совпадений наблюдалось вблизи времени регистрации нейтринной вспышки 2:52 UT 23 февраля 1987 года детектором LSD.

Детекторы LVD и БПСТ состоят из сцинтилляционных счетчиков – контейнеров, заполненных жидким сцинтиллятором. Энергетический порог в LVD составляет 5 МэВ, в БПСТ – 8 МэВ. Порядок отбора событий (одиночных импульсов) в детекторах одинаков: требуется срабатывание только одного счётчика во всей установке. При анализе событий в БПСТ использовались данные внутренних счетчиков, образующих три нижние горизонтальные плоскости детектора. В LVD смотрели все счетчики. Кроме этого, в LVD после триггерного импульса (срабатывания) каждого счётчика фиксируются энерговыделения выше 0.5 МэВ в течение 1 мс. Это гамма-кванты от захватов протонами или ядрами железа нейтронов, рождённых в реакциях обратного бета-распада:  $[\nu_e + p \rightarrow e^+ + n]$ .

После отбора одиночных импульсов в обоих детекторах проводился отбор счётчиков по их скорости счёта. Из анализа исключались счётчики, скорость счёта которых оказалась существенно выше среднего темпа счёта в детекторе.

В течении 10 суток до и после 17 августа 2017 проводился поиск совпадений импульсов одиночных событий детекторов в одной секунде. Измеренная скорость счёта совпадений импульсов представлена в табл.1. Скорость счёта одиночных импульсов во всем детекторе LVD составляет  $\lambda_{LVD}=0.25 \text{ с}^{-1}$ , ( $0.06 \text{ с}^{-1}$ ,  $0.09 \text{ с}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ с}^{-1}$  в первой Т1, второй Т2 и третьей Т3 башне LVD, соответственно). В БПСТ скорость счёта одиночных импульсов составляет  $\lambda_{БПСТ}=0.009 \text{ с}^{-1}$ . Расчётная скорость счёта совпадений представлена в табл. 4 (нижняя строка). Скорости счёта совпадений детекторов рассчитывались по формуле:  $\lambda_{\text{расч}} = 2 \times \lambda_{LVD} \times \lambda_{БПСТ} \times t$ , где  $\lambda$  – скорость счёта одиночных импульсов в детекторах LVD и БПСТ,  $t = 1 \text{ с}$  – максимальное время между одиночными импульсами.

**Таблица 4.** Скорости счёта совпадений одиночных импульсов в LVD и БПСТ.

	LVD–БПСТ	T1 LVD –БПСТ	T2 LVD –БПСТ	T3 LVD –БПСТ
$\lambda_{\text{экс}}, \text{ с}^{-1}$	0.0043	0.0010	0.0014	0.0016
$\lambda_{\text{расч}}, \text{ с}^{-1}$	0.0045	0.0011	0.0016	0.0018

На рис. 30 слева представлены совпадения в 1 секунде одиночных импульсов в LVD (для каждой башни отдельно) и БПСТ в период 10 часов до и после сигнала GW170817 (бин длительностью 500 с). Число совпадений одиночных импульсов не имеют значительных отклонений от средних значений. На рис. 30 справа представлена временная диаграмма совпадений одиночных импульсов в LVD и БПСТ в часовой окрестности регистрации GW170817. Чёрточка на временной диаграмме соответствует одному импульсу в детекторе.

На рисунке показано, в какой именно башне детектора LVD был зарегистрирован одиночный импульс.

Большинство совпадений одиночных импульсов наблюдается в третьей башне LVD. В течение 1000 с после регистрации гравитационной волны наблюдается кластер из 5 совпадений одиночных импульсов в БПСТ и Т3 LVD. Длительность кластера составляет 477 с, первое совпадение в кластере обнаружено на 266 с позже времени регистрации гравитационной волны GW170817.

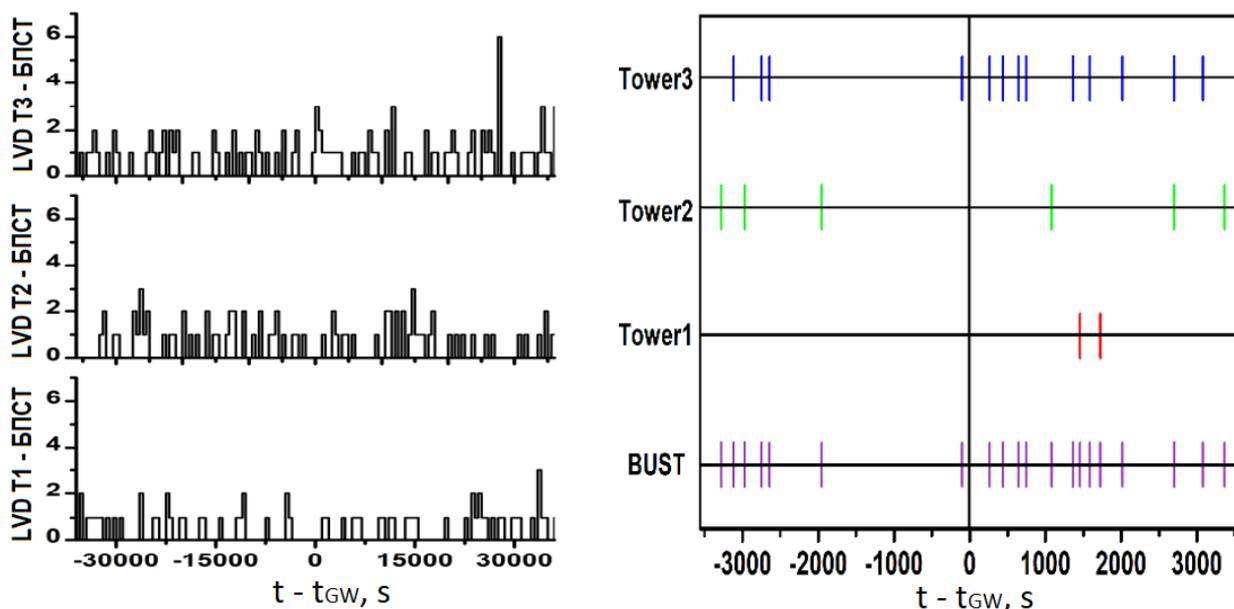


Рис. 30. Количество совпадений одиночных импульсов за 500 с в LVD и БПСТ (слева);  
Временная диаграмма единичных совпадений импульсов в LVD и БПСТ (справа).

## 10. Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS (Задача №10)

Проводились работы по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS. Так как используемые жесткие критерии отбора коллапсных событий на БПСТ позволяют избежать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности, в настоящее время информация анализируется в реальном времени (в течение 20 минут). В случае обнаружения события-кандидата на нейтринную вспышку от взрыва Сверхновой с коллапсом ядра программой вырабатывается алерт, по которому группе экспертов коллаборации БПСТ автоматически рассылается информация о таком событии, в сообщениях по электронной почте и СМС-сообщениях. На анализ всей информации о событии требуется примерно один час. В случае регистрации реального события (нейтринной вспышки от взрыва Сверхновой с коллапсом

ядра), будет сделано оповещение мировой научной общественности о таком событии.

## **11. Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОВЕР-2 и TAIGA. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ (Задача №11)**

### **11.1. Анализ данных полученных на установке Ковер-2**

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке “Ковер-2” по всем физическим задачам. На качество и объем набранной информации в 2019 году отрицательно повлияли плановые и незапланированные отключения электроэнергии, в отчетном году было десять таких отключений. Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Было отремонтировано и настроено 70 логарифмических LC-преобразователей центральной части установки и 4 RC-преобразователя мюонного детектора. Были отремонтировано 12 детекторов (9 жидкостных и 3 пластических), причиной которых явилось выхода из строя делителей и ФЭУ-49 (заменены 6 ФЭУ). Был отремонтирован годоскоп импульсных каналов (ГИК) Ковра. Для настройки коэффициентов преобразования RC-преобразователей мюонного детектора был разработан и создан специальный блок.

Чистое время набора информации составляет 96% календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ, 95% для регистрации мюонной компоненты ШАЛ на Мюонном Детекторе (МД) и 98% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

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 настоящее время 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 новой серии информации составляет 448 суток. По новому набору данных получено распределение превышений над фоном по небесной сфере. Для

четырёх точечных источников (Mrk 421, Mrk 501, Cyg X-3 и Крабовидная туманность) получены ограничения на поток фотонов сверхвысокой энергии.

В ходе работы получены предварительные результаты поиска космических гамма-лучей очень высокой энергии с помощью данных установки Ковер-2. Благодаря мюонному детектору с площадью  $175 \text{ м}^2$ , становится возможным поиск ливней, вызванных первичными фотонами. Были изучены два набора данных: набор данных с большой экспозицией и условием триггера, позволяющие искать фотоны с энергией  $E_\gamma > 1 \text{ ПэВ}$ , и набор данных с меньшей экспозицией, но более низким порогом для гамма-излучения,  $E_\gamma > 0,3 \text{ ПэВ}$ . Результаты включают в себя верхние пределы с уровнем достоверности 95% для потоков фотонов  $\text{PeV}$  от суммированных направлений высокоэнергетических событий нейтрино IceCube. Также были представлены верхние пределы на потоки фотонов из набора из четырёх предварительно определенных точечных источников: Crab, Cyg X-3, Mrk 421 и Mrk 501. Один из источников, Mrk 421, демонстрирует слабое превышение сигнала над фоном в обоих независимых наборах данных установки; его происхождение еще предстоит выяснить. Крабовидная туманность тоже демонстрирует незначительное превышение сигнала над фоном при переходе ко второму набору данных, и будет подвергнута мониторингу.

## **11.2. Участие в работе международной коллаборации TAIGA**

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше  $100 \text{ ТэВ}$ .

Произведен физический запуск второй очереди черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE. Количество оптических станций доведено до 54. Общая площадь установки составляет  $0,5 \text{ км}^2$ ; энергетический порог –  $80\text{-}100 \text{ ТэВ}$  ( $40\text{-}50 \text{ ТэВ}$  для гамма-квантов высоких энергий); угловое разрешение –  $\sim 0,1^\circ$ . Измерен спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий  $10^{14}\text{-}10^{17} \text{ эВ}$ , рис.31.

Начаты измерения на втором атмосферном черенковском телескопе изображения TAIGA-IACT. Ведутся совместные наблюдения двух телескопов изображения TAIGA-IACT и установки TAIGA-HiSCORE за локальными источниками гамма-квантов высоких энергий. На рис. 32 представлены один из атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT и одна из оптических станций черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE.

По данным сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE установлен предел на

диффузный поток гамма-квантов высоких энергий.

В установке Tunka-133 площадью 3 км<sup>2</sup> измерен энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в диапазоне энергий 10<sup>15</sup>-10<sup>18</sup> эВ установки TAIGA-HiSCORE.

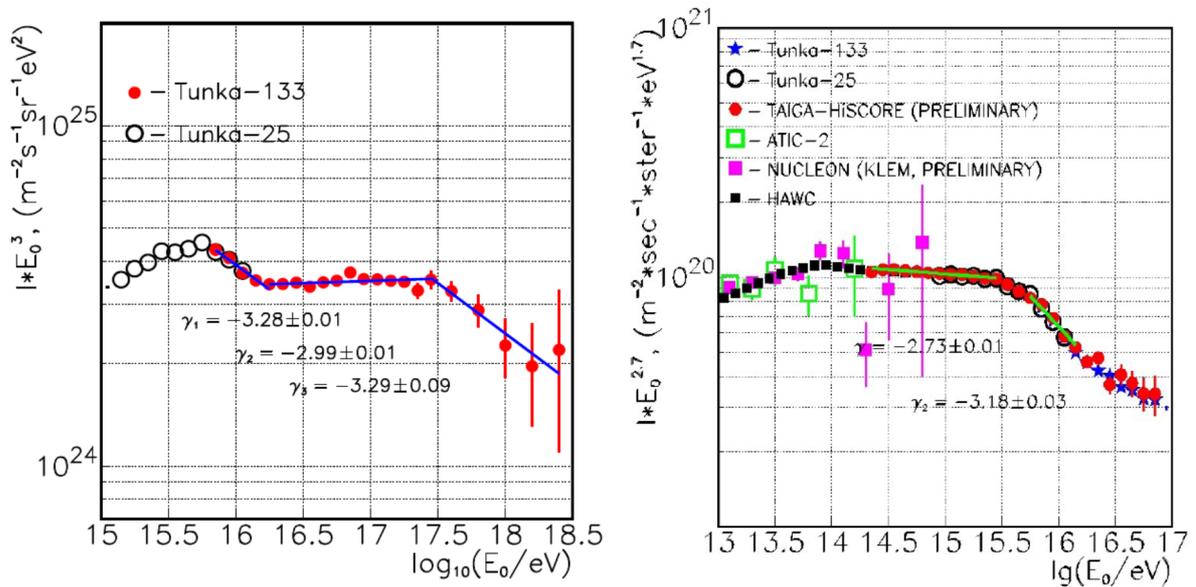


Рис. 31. Энергетический спектр первичных космических лучей, измеренный на установках TAIGA-HiSCORE (слева) и Tunka-133 (справа).



Рис. 32. Один из черенковских атмосферных телескопов изображения TAIGA-IACT (слева) и одна из оптических станций черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE (справа).

## 12. Получение ограничений или обнаружение солнечных адронных аксионов (Задача №12)

Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром <sup>83</sup>Kr в зависимости

от вероятности излучения аксиона в данном переходе  $(\omega_A/\omega_\gamma)$ , параметра  $(g_3-g_0)^2$ , описывающего аксионнуклонное взаимодействие, и массы аксиона в KSVZ-модели может быть представлена как:

$$\begin{aligned} R[\text{Г}^{-1}\text{сут}^{-1}] &= 4.23 \cdot 10^{21} \omega_A/\omega_\gamma = \\ &= 8.53 \cdot 10^{21} (g_{AN}^3 - g_{AN}^0)^4 (p_A/p_\gamma)^6 = \\ &= 2.41 \cdot 10^{-10} m_A^4 (p_A/p_\gamma)^6. \end{aligned}$$

Количество зарегистрированных  $\gamma$ -квантов, следующих за поглощением аксиона, определяется массой мишени, временем измерений и эффективностью регистрации детектора, в то время как вероятность наблюдения пика с энергией 9.4 кэВ зависит от уровня фона экспериментальной установки. Для регистрации рентгеновских и  $\gamma$ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих в результате разрядки возбужденного уровня с энергией 9.4 кэВ, используется большой медный пропорциональный счетчик, заполненный криптоном, обогащенным по изотопу  $^{83}\text{Kr}$  до 99,9%. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л, давление газа — 1.8ат. Масса изотопа  $^{83}\text{Kr}$  в рабочем объеме 58.5 г. Счетчик окружен пассивной защитой из меди (20 см), свинца (20 см) и полиэтилена (8 см). Установка расположена в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН на глубине 4900 м.в.э. (НЛГЗ-4900), где поток мюонов космических лучей ниже более чем в  $10^7$  раз по сравнению с поверхностью. На данный момент набрана статистика за ~800 сут измерений. Идет обработка полученных данных. По результатам измерений получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:

$|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.16 \times 10^{-17}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:  $m_A \leq 12.6$  эВ (95% У.Д.).

Монохроматические аксионы могут излучаться в M1-переходе в ядрах  $^{57}\text{Fe}$  на Солнце, по аналогии с  $^{83}\text{Kr}$ . Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром  $^{57}\text{Fe}$  в  $3.5 \cdot 10^3$  раз выше, чем для  $^{83}\text{Kr}$ . Однако на данный момент нет детекторов ионизирующего излучения, с достаточно хорошим энергетическим разрешением, основанных материале содержащим железо в значительном количестве.

В качестве возможного рабочего материала детектора выбран пирит ( $\text{FeS}_2$ ). Пирит является полупроводником, что может позволить использовать его как материал для полупроводникового детектора или криогенного болометра.

Организовано сотрудничество с Воронежским государственным университетом

(химический факультет, кафедра неорганической химии) по вопросу выращивания монокристаллов содержащих железо. Рассматриваются три варианта: Пирит ( $\text{FeS}_2$ ) и два твердых раствора  $\text{GaS:Fe}$  и  $\text{Ga}_2\text{S}_3:\text{Fe}$  с содержанием железа  $\sim 5\%$ . (работа по  $^{57}\text{Fe}$  выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 16-29-13011 офи-м).

### **13. Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ (Задача №13)**

#### **13.1. Изучение проблемы мюонного избытка в данных ведущих экспериментов по изучению космических лучей.**

Данная работа объединила результаты по изучению адронных взаимодействий и плотности мюонов восемь ведущих экспериментов по изучению космических лучей, и охватывает диапазон энергии ливней от ПэВ до десятков ЭэВ. В нескольких экспериментах сообщалось об избыточной плотности мюонов в ШАЛ по сравнению с предсказаниями адронных моделей. В то время как другие эксперименты сообщали об отсутствии расхождений между данными и результатами моделирования. В работе показано что избыток мюонов в наблюдаемых ШАЛ по сравнению с предсказаниями адронных моделей EPOS-LHC и QGSJet-II.04 увеличивается с ростом первичной энергии ливня с достоверностью 8 стандартных отклонений.

#### **13.2. Создание установки PRISMA-LHAASO в рамках международной обсерватории LHAASO**

В 2019 г. было проведено несколько совместных сеансов измерений установкой YBJHA в Тибете (Янгбаджинг) и прототипом установки ENDA из 16 эн-детекторов. На рис. 33. показан пример события с осью внутри ENDA с измерениями трех компонент ШАЛ: электронной, мюонной и нейтронной. В результате измерений была проведена калибровка эн-детекторов по электронам.

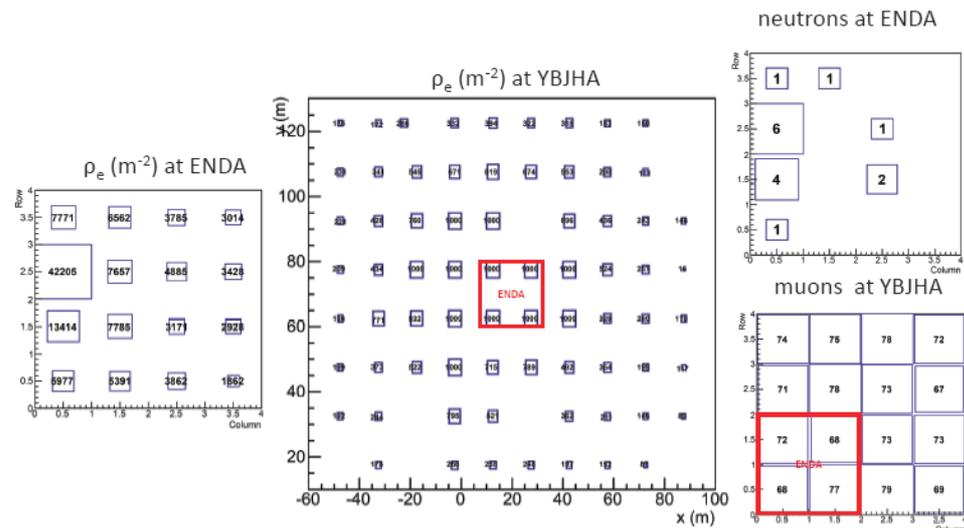


Рис. 33. Событие зарегистрированное одновременно ENDA-16 и YBJHA.

Разрабатываемый нами новый метод измерения химического состава космических лучей по соотношению между электронной и нейтронными 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. рис. 34) 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  $\gamma$  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:  $\langle A \rangle \approx 5$ .

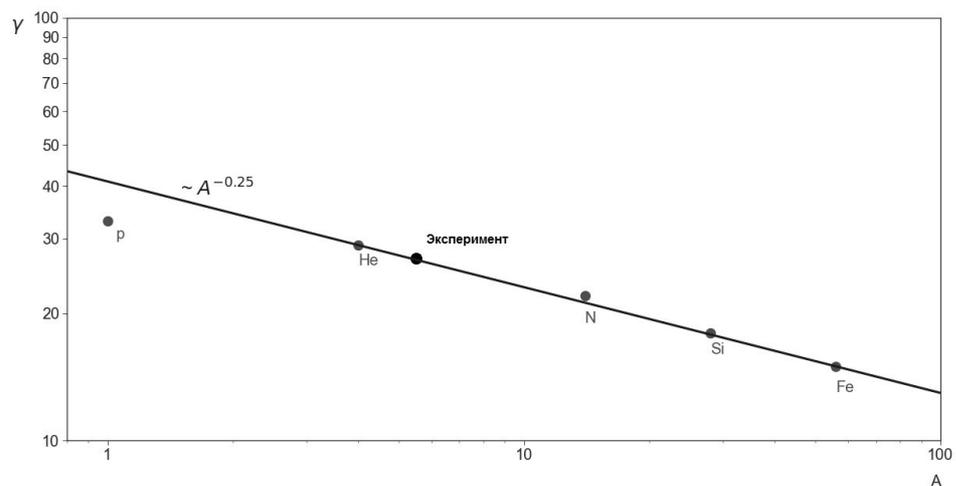


Рис. 34. *Результаты моделирования и экспериментальные данные.*

Начато создание полномасштабной установки ENDA в рамках международного проекта LHAASO. В сотрудничестве с китайскими коллегами собран, настроен и включен в тестовый режим первый кластер из 16 модернизированных эн-детекторов на основе нового недорогого борного сцинтилляционного светосостава и с улучшенным светосбором. 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.

Получены новые интересные результаты по программе изучения вариаций природных потоков тепловых нейтронов с помощью эн-детекторов в различных геофизических условиях. В частности, в 2019 г. был опубликован анализ вариационных данных установки PRISMA-YBJ и обнаружен и объяснен отклик природного потока тепловых нейтронов на землетрясения с эпицентром на расстояниях до 600 км. На рис. 35 показан отклик эн-детекторов на Непальское землетрясение 25.04.2015 и его афтершоки.

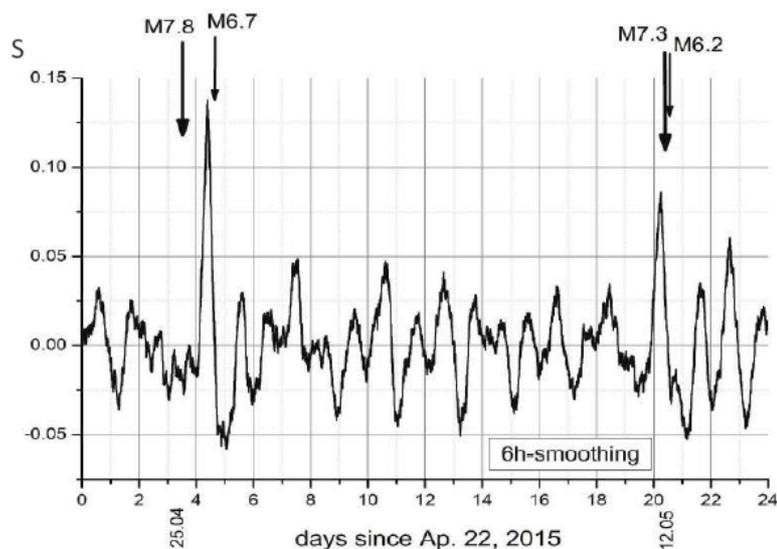


Рис. 35. *Отклик эн-детекторов на расстоянии ~600 км от эпицентра Непальского землетрясения.*

В 2019 году продолжались работы по созданию установки “Ковер-3”. В настоящее время в подземных туннелях МД установлены 410 сцинтилляционных счетчиков с общей непрерывной площадью 410 м<sup>2</sup>, которые полностью укомплектованы электроникой. Все 235 новых счетчиков настроены по усилению. Создана и включена в работу в режиме тестирования система сбора данных новой конфигурации МД. На поверхности поглотителя

МД установлены 7 модулей, в каждом из которых находится по 9 сцинтилляционных счетчика на основе пластического сцинтиллятора. Выполнена настройка этих счетчиков по усилению.

#### **14. Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере (Задача №14)**

Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной способности различать массовый состав анизотропии в экспериментальных данных Telescope Array с помощью распределения параметр  $\xi$ . Что касается будущей работы, то должны быть рассчитаны корреляционные функции более высокого порядка, чтобы они представляли пространственное распределение в точности. Существующий уровень классификации не позволяет вводить первичные ядра промежуточной массы в исследования анизотропии состава массы, такие как гелий и азот. Последнее может стать возможным с развитием методов машинного обучения, которые будут разделять первичные частицы с гораздо лучшей точностью. В долгосрочной перспективе внедренный подход может стать одним из решающих шагов в идентификации источников космических лучей и механизмов ускорения.

#### **15. Разработка новой модели взаимодействий адронов FANSY 2.0 воспроизводящей, во-первых, более широкий (сравнительно с другими моделями) круг основных экспериментальных результатов в области энергий $10^{11} - 10^{18}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и ядрами, имеющих важное значение для исследований фрагментационной области генерации частиц; во-вторых, моделирующей компланарную генерацию наиболее энергичных частиц при сверхвысоких энергиях (Задача №15)**

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

В течение 2019 г. была продолжена отладка и юстировка основного варианта 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 как при низких ( $\sqrt{s} = 17 - 63$  ГэВ), так и при сверхвысоких ( $\sqrt{s} < 14$  ТэВ) энергиях LHC.

FANSY 2.0 воспроизводит основные экспериментальные данные по протон-протон

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).

По полученным результатам этой работы в журнале European Physical Journal Plus опубликована статья.

В соответствии с планом на 2019 г., FANSY 2.0 моделирует взаимодействия мезонов (в первую очередь, пионов и каонов) с протонами. По полученным результатам этой работы подготовлена статья, которая будет представлена в журнал European Physical Journal Plus.

## **16. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам, наблюдаемым в экспериментах на БАК и в космических лучах (Задача № 16)**

В рамках версии FANSY 2.0 QGSCPG, разработанной на основе базовой модели FANSY 2.0 QGSJ и воспроизводящей компланарную генерацию наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях протонов с нуклонами при энергиях  $E_0 > 10^{16}$  эВ ( $\sqrt{s} > 5$  ТэВ), было начато исследование возможных противоречий результатов экспериментов в космических лучах по явлению компланарности ЭВЧ с данными CMS по “ridge” эффекту. Было показано, что очень маловероятно согласование “ridge” эффекта и явления компланарности ЭВЧ в рамках первоначальной, предложенной около 15 лет назад, концепции объяснения компланарности большими поперечными импульсами в плоскости компланарности ЭВЧ. Но появляется вероятность согласования в рамках новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Расчеты показали, что новая гипотеза может быть проверена в рамках предложенного нами эксперимента на LHC с использованием детектора CASTOR LHC.

По полученным результатам этой работы в журналах European Physical Journal C и J. of Physics: Conf. Ser. опубликованы статьи.

## **17. Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывной регистрации с чувствительностью $10^{-19}$ Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям (Задача № 17)**

В подземной лаборатории на БНО ИЯИ РАН выполнена следующая модернизация

оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН):

- выполнена сейсмо и акусто изоляция измерительного опорного резонатора (дискриминатора); достигнуто ослабление фона сейсмо -акустических возмущений на полтора порядка.

- выполнена замена зеркал за высокотехнологичные с высоким отражением и низкими потерями: 1-2 ppm поглощение и 3-6 ppm рассеяние. После замены зеркал, резкость в ФП детектора OGRAN достигла 30 000, в опорном ФП резонаторе 78 000, что привело к увеличению коэффициента амплитудной передаточной функции более чем на порядок величины; контраст интерференции также был увеличена до 60%.

- выполнено активное подавление паразитной амплитудной модуляции оптической накачки, что улучшило SNR на порядок.

- для повышения эффективной мощности оптической накачки в резонаторах ФП выполнен переход к многоканальному фото детектированию (из 4х параллельных ветвей) с заменой кремниевых фотодиодов на диоды InGaAsP с квантовым выходом 0.7.

В итоге коэффициент преобразования возмущения сигнала из гравитационно-деформационной формы в оптоэлектронную увеличивается более чем на порядок. В результате расширена полоса эффективного приема GW-сигналов на антенне ОГРАН: на уровне  $10^{-18}$  стрейн / Гц<sup>1/2</sup>, полоса приема расширилась от 7 Гц до 30Гц.

Разработана процедура совместной обработки данных детекторов ОГРАН и БПСТ. Её принцип заключается в улучшении характеристик обнаружения события гравитационной антенной за счет дополнительной информации от нейтринного телескопа о текущем фоне нейтринных событий. В свою очередь, контрольная запись гравитационного детектора дополнительно уменьшает количество кандидатов (подозрительных всплесков) для сигнальных нейтрино от коллапса. Когерентный анализ нейтринного фона позволяет сузить временной интервал (окно) поиска GW возмущений на гравитационной антенне.

Исследовалось возможность повышения чувствительности ОГРАН за счет охлаждения акустического детектора. С этой целью проведено исследование криогенных ФП резонаторов с зеркалами различных подложек. Показано что удовлетворительными свойствами обладают подложки фторида кальция.

## **18. Организация прецизионных измерений вариаций электрического и магнитного полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов (Задача № 18)**

### **18.1. Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике конкретных гроз**

Анализируя событие импульсного разряда (3:04) в комплексе, установлено, наиболее вероятной причиной внезапного скачка интенсивности мюонов явилась семиминутная цепь взаимосвязанных событий. Далее даётся их описание, основанное на интерпретации измерений. Сразу, после момента землетрясения на Филиппинах (10.44 N 125.42 E, 24.07.2014, 23:57:27 UT, M5.3), севернее установки, в удалении на десятки километров (10-30км), одновременно с увеличением яркости всего ночного неба, в тропосфере на периферии, дополнительно, появилась отрицательная разность потенциалов. Этот момент сопровождался горизонтальным пробоем на убегающих электронах локальной области атмосферы в этом районе. В качестве доказательства такого утверждения можно отметить три факта. 1) Имеется регистрация импульса мягкой (10-17 МэВ), наиболее рассеиваемой из регистрируемого спектра компоненты тормозных гамма-квантов, генерируемых в этом случае лавинами ускоренных электронов. Горизонтальные пунктирные линии на рисунке (рис. 36) отмечают коридор стандартных случайных отклонений ( $\pm\sigma$ ). 2) Возмущение энергичной компоненты фотонов (17-30 МэВ), сохраняющей направление ускоренных электронов, в этот момент статистически не обнаруживается. 3) Из вариаций мюонов следует расположение положительного заряда над установкой и отрицательного на периферии.

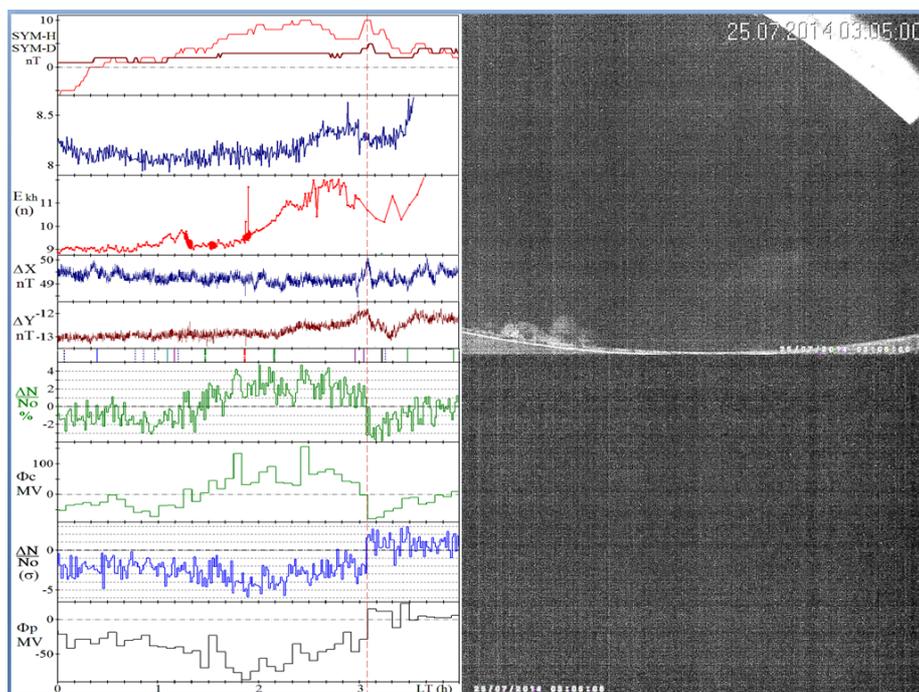


Рис. 36. Слева, графики вариаций различных компонент анализируемых в событии 24-25072014. Справа, фотографии ночного неба, сделанные в с. Хасанья (верхнее фото) и в п. Нейтрино (нижнее).

Яркость фотографий увеличена в 10 раз. На верхнем фото видно локальное свечение. Момент фотографий на графиках отмечен вертикальной пунктирной линией. Описание графиков по порядку сверху вниз: Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля, красным цветом – индекс SYM-H (направление на север), коричневый – индекс SYM-D (направление на восток). Яркость свечения в относительных единицах правой области «тропосферы» в п. Нейтрино (обзор камеры направлен на юг). Яркость свечения центральной области «ионосферы» в с. Хасанья (обзор камеры направлен на восток). Вариации локального магнитного поля (X-компонента, направление на север). Вариации локального магнитного поля (Y-компонента, направление на восток). Моменты землетрясений по миру (<https://www.emsc-csem.org/Earthquake>). Отметки около 2 ч: красная - землетрясение на Северном Кавказе M3.3, зелёная – остров в Эгейском море M2.4. Вариации «вертикальных» мюонов (E более 100 МэВ). Восстановленная по вариациям «вертикальных» мюонов разность потенциалов в тропосфере над установкой. Вариации «периферийных» (наклонных) мюонов. Характерная разность потенциалов в тропосфере вдали от установки на расстоянии более 10 км. Разность потенциалов измеряется между средним уровнем генерации мюонов ( $\approx 12$  км над уровнем моря и уровнем земли)

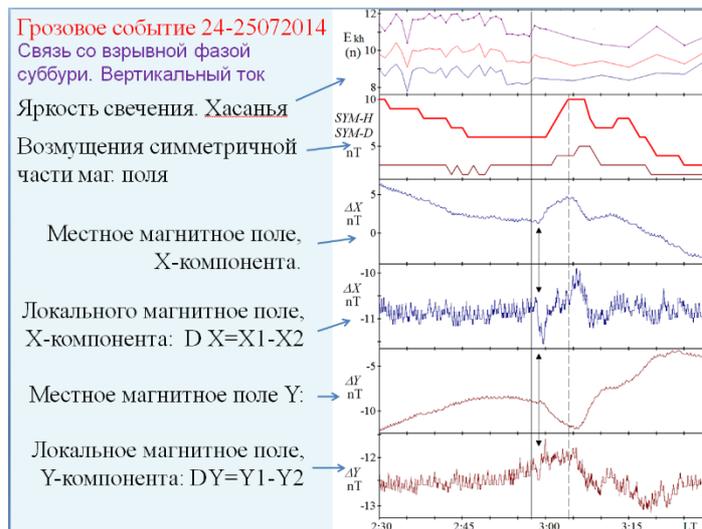


Рис. 37. Пунктирной линией отмечен момент горизонтального разряда

В период с 4:15 по 6:00 имела место наиболее значительная суббуревая активизация. Анализ наличия локальных токов, описанный выше, показал, что в этот период на масштабе 100 км регистрировались Pi2 пульсации характерные для суббурь. Анализируя вариации мюонов этого периода, отвечающих разности потенциалов в тропосфере над установкой и на периферии, были отмечены два импульсных горизонтальных разряда (4:29:40 и 4:46:40) в отсутствие дождя и молниевой активности. Было уже светло и на фотографиях, сделанных видеокамерами в п. Нейтрино и с Хасанья, видно, что разряды произошли под голубым небом. На представлены графики вариаций мюонов «периферии» и локального магнитного поля более подробно. Видна хорошая корреляция мюонов с X-компонентой в период до 4:25 предшествующий импульсному разряду. После этого момента наблюдается смещение фазы. Момент колебания в противофазе завершился разрядом. Это измерение, возможно, проливает новый свет на понимание происхождения и участия Pi2 пульсаций в природе.

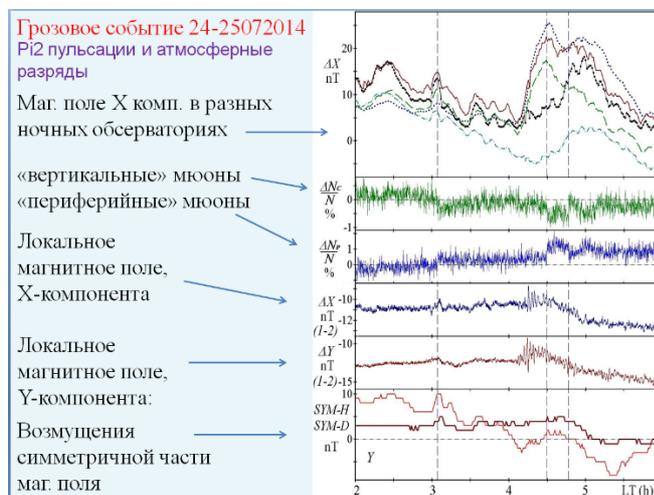


Рис. 38. Каскад суббурь 25072014. Время указано местное, опережающее мировое на 3 ч.



Рис. 39. Фотографии утреннего неба над БНО в период горизонтальных разрядов. Свидетельство отсутствия грозовой облачности. Слева – вид из п. Нейтрино (от установки 0.5 км). Справа – вид из с. Хасанья (75 км). Верхний ряд – момент 4:30 (Фотография справа выполнена в чувствительном к ИК излучению чёрно-белом формате. Видны горы, свидетельствующие об отсутствии низкой облачности). Нижний ряд – момент 4:50, видно голубое небо.

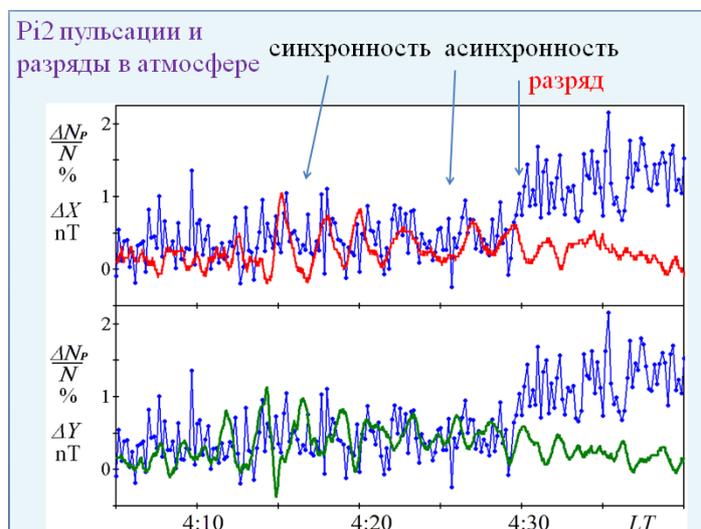


Рис. 40. Корреляция интенсивности мюонов «периферии» и Pi2 пульсаций (X компонента)

## 18.2. Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, посредством медленного пробоя на убегающих электронах в припороговом режиме

Более подробно информация представлена на рис. 41. В результате грозовой деятельности, в тропосфере, образовалась положительная разность потенциалов (был

сильный отрицательно заряженный дождь). При этом уверенно регистрировался поток гамма – квантов (по спектральным оценкам генерированный на стратосферных высотах) сопровождаемый свечением ночной атмосферы. Свечение зарегистрировано видеокамерой в Хасанье, некоторая неприятность в том, что при этом светила ещё и луна. Как показано на рис. 41 вертикальной линией, начиная с момента 22:25, совпадающего с началом небольшого сейсмического возмущения, отмеченного наклономером, положительная разность потенциалов в тропосфере начинает падать вплоть до переполюсовки. Это сопровождается ростом отрицательной приземной напряжённости, генерацией гамма – квантов и свечением, зарегистрированным в Хасанье. Луна при этом уже не подсвечивала, скрывшись за горизонт. Ступенчатый характер данных наклономера объясняется его, на тот момент, разной чувствительностью в зависимости от измеряемого диапазона. Отрицательный заряд, появившийся в стратосфере (это из характера спектра регистрации генерированных гамма - квантов) опускается вниз, повышая амплитуду отрицательного приземного поля, при этом, начиная с момента 22:30:20, генерация гамма – квантов резко падает (возможно сказался эффект повышения плотности воздуха). Такой же эффект заметен в яркости свечения неба в области «тропосфера» по наблюдению из с. Хасанья. Опускающийся атмосферный заряд, приближаясь к земле, усилил экспоненциально напряжённость приземного поля, после чего произошёл импульсный разряд длительностью 40 с. В этот момент, наклономер, зарегистрировал «горный удар», то есть маленькое сотрясение горы. Последующий короткий положительный всплеск приземной напряжённости, по- видимому, отвечает уходящим токам по земле. Нужно отметить, что шумовой канал этот эффект не зафиксировал, что бывает при медленных и горизонтальных разрядах. Важно, что в этом событии не понятно где первоначально появился заряд: отрицательный в ионосфере, или положительный под землёй.

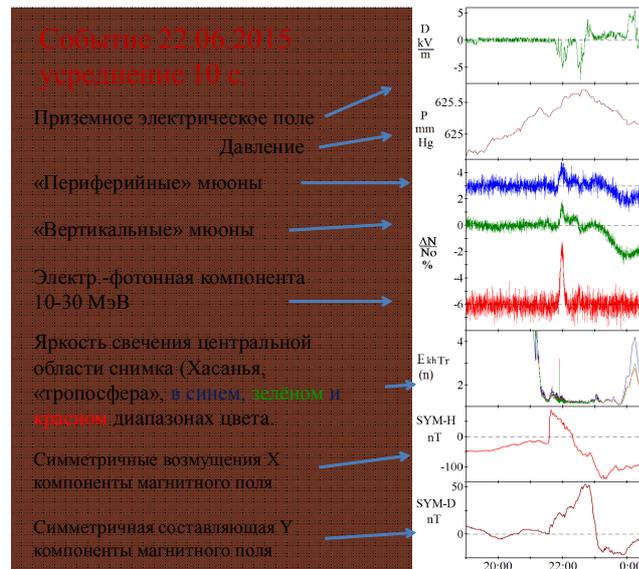


Рис. 41. Грозовое событие 22.06.2015 проходившее на фоне магнитосферной суббури с внезапным началом во время землетрясения (36.79 N 27.84 E 22.06.2015, 18:33:54 UT, M2.1) и Форбуш-понижения с началом в 22:30.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### 1. Задача «Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами заверенных НИОКР»

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2020 г.

По результатам исследований по теме Задачи 1 в 2019 году было опубликовано 4 статьи и 3 доклада на международных совещаниях и конференциях.

### 2. Задача «Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»»

План работ на 2019 год выполнен полностью.

База экспериментальных данных пополнилась за счет непрерывного набора в течение 10 месяцев 2019 года. Из них 8 месяцев шел набор данных телескопом из 5 кластеров. Часть данных обработана и подготовлена для анализа и поиска событий, связанных с астрофизическими нейтрино высоких энергий.

По результатам исследований по теме Задачи 2 в 2019 г. было опубликовано 5 статей и два доклада на международных конференциях.

### **3. Задача «Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В результате физического и компьютерного моделирования установлены все параметры системы сбора данных запущенного в эксплуатацию в 2019 году телескопа Baikal-GVD из 5 кластеров и в геометрии из семи кластеров, которые планируется запустить в эксплуатацию в 2020 г.

По результатам исследований по теме Задачи 3 в 2019 году был опубликован 1 доклад на международной конференции. По материалам конференции подготовлена статья для публикации.

### **4. Задача «Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 4 в 2019 году было опубликовано 2 статьи и один доклад на международной конференции. По материалам конференции подготовлена статья для публикации.

### **5. Задача «Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 5 в 2019 году было опубликовано 2 статьи и 3 доклада на международных конференциях. По материалам конференций подготовлены статьи для публикаций.

### **6. Задача «Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 6 в 2019 году было опубликован 1 доклад на международном совещании.

**7. Задача «Измерение скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам» № 7.**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Завершен первый этап эксперимента BEST по экспозиции галлиевых мишеней нейтринным источником  $^{51}\text{Cr}$  активностью  $3,41 \pm 0,02$  МКи.

**8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».**

В качестве Нового большого сцинтилляционного жидкостного детектора (в частности, Нового баксанского нейтринного телескопа) для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников были рассмотрены детекторы двух типов в зависимости от цели. В качестве важнейшей задачи рассматривалась возможность регистрации потоков солнечных CNO нейтрино и геоантинейтрино от распада изотопа  $^{40}\text{K}$  в недрах Земли. Обнаружение и исследование потоков геоантинейтрино от распада изотопа  $^{40}\text{K}$  особенно важно в связи с предсказаниями модели «Богатая водородом Земля».

Произведённый анализ полученных данных малоформатной установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора выявил необходимость её модернизации с целью повышения чувствительности. Разработаны мероприятия по её модернизации.

**9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В 2019 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд в детекторах LVD и АСД. Так как не было вспышек сверхновых в нашей галактике, то мы установили самое сильное ограничение на частоту вспышек в Галактике: менее 1 события за 18.2 г. на 90% уровне достоверности. Проводился поиск коррелированных событий нейтринных детекторов LVD и БПСТ во время сигнала от слияния нейтронных звезд GW170817. В течение часа около времени сигнала GW170817 увеличивается количество

совпадений в БПСТ и в третьей башне LVD. Была найдена группа из 5 совпадений с продолжительностью 477 с.

На установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, и проводились работы по модернизации установок. 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.

#### **10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Проводились работы по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS. В случае регистрации реального события (нейтринной вспышки от взрыва Сверхновой с коллапсом ядра), будет сделано оповещение мировой научной общественности о таком событии.

#### **11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Были представлены первые результаты поиска первичных фотонов с энергиями  $E > 100$  ТэВ по данным установки Ковер-2.

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Получены и опубликованы экспериментальные данные.

#### **12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В 2019г был продолжен эксперимент с  $^{83}\text{Kг}$ . По результатам измерений получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:  $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.16 \times 10^{-17}$ . В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов:  $m_A \leq 12.6$  эВ (95% У.Д.). Измерения с  $^{83}\text{Kг}$  продолжаются.

Поиск материалов содержащего  $^{57}\text{Fe}$  с целью разработки детектора аксионов продолжается.

### **13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Изучена мюонная компонента ШАЛ, что позволяет установить границы применимости моделей взаимодействия адронов высоких энергий.

В результате выполненных в 2019 г. работ были протестированы и усовершенствованы все узлы создаваемой установки PRISMA-LHAASO (ENDALHAASO). 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 и объяснен отклик этого потока на сильные землетрясения в радиусе 600 км.

Продолжались работы по созданию ливневой установки нового поколения “Ковер-3”.

### **14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Проведены исследования анизотропия массового состава космических лучей по данным эксперимента Telescope Array.

### **15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях $10^{11} - 10^{17}$ эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

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

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 ЛHC.

**16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Результаты сравнения данных ЛHC и моделирования эффекта компланарности энергетически выделенных частиц требуют введения новой концепции объяснения эффекта уменьшенными поперечными импульсами, направленными перпендикулярно плоскости компланарности. Предложена концепция проведения эксперимента CASTOR ЛHC для проверки явления компланарной генерации наиболее энергичных вторичных частиц при сверхвысоких энергиях.

**17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Произведена модернизация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН с целью запуска её в режим непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям.

**18. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

На базе разработанного экспериментального метода исследования новых геофизических процессов во время гроз, зарегистрировано явление взаимного влияния магнитосферной бури с грозовой активностью. Также измерены их параметры.

Установлено что во время магнитосферных суббурь малой мощности на предварительной стадии и в начале фазы развития возможно проникновение возмущений на средние широты  $\sim 40^\circ$  над грозowymi очагами. Проявляется в виде диффузного свечения типа «полярное сияние» яркостью  $\sim 3 \cdot 10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup>.

Зарегистрировано наличие возмущения магнитного поля (1 нТл) соответствующего локальному току в ионосфере, в восточном направлении, на широте геомагнитного диполя  $40^\circ\text{N}$ , сопутствующий магнитосферной суббуре в период взрывной фазы.

На фоне магнитосферной суббури с внезапным началом, во время грозы, зарегистрирован факт постепенного проникновения большого отрицательного заряда с ионосферных высот в землю в ходе медленного пробоя на убегających электронах в припороговом режиме.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Пресс-релиз. Первый кластер глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD вступил в строй на оз. Байкал. Москва, ИЯИ РАН, 19 мая 2015 г. <http://www.inr.ru>
- [2] Пресс-релиз 2019. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD увеличен с трех до пяти кластеров оптических модулей, и его эффективный объем составил  $0.25 \text{ км}^3$ . ИЯИ РАН, Москва, 19 апреля 2019 г., <http://www.inr.ru>
- [3] Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD. Статус 2019 и перспективы. Москва, 2019, <http://www.inr.ru>
- [4] Avrorin A.D. et al. A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200 // *Astropart.Phys.* 81 – 2016 – p. 12-20 // DOI: 10.1016/j.astropartphys.2016.04.004 e-Print: arXiv:1512.01198 [astro-ph.HE]
- [5] Avrorin A.D. et al. Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo. // *JETP Lett.* 101 – 2015 - №5 - p. 289-294 // DOI: 10.1134/S0021364015050021 e-Print: arXiv:1412.3672 [astro-ph.HE]
- [6] Avrorin A.D. et al. Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector Baikal Collaboration. // *Astropart.Phys.* 62 – 2015 - 12-20 // DOI: 10.1016/j.astropartphys.2014.07.006 e-Print: arXiv:1405.3551 [astro-ph.HE]
- [7] K. N. Abazajian et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper // arXiv:1204.5379 [hep-ph], - 2012 - pp.170-175.
- [8] V.Gavrin et al. Current Status of New SAGE Project with  $^{51}\text{Cr}$  Neutrino Source. *Physics of Particles and Nuclei.* 2015. Vol.46, No.2. pp.131-137
- [9] V. N. Gavrin et al. Search for Sterile Neutrinos in Gallium Experiments with Artificial Neutrino Sources. // *Physics of Particles and Nuclei* 48 – 2017 - №6 - p. 967–969
- [10] V. Barinov et al. BEST sensitivity to  $O(1)$  eV sterile neutrino. // *Phys. Rev. D* 93 – 2016 - 073002
- [11] V. Barinov et al. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly // *Phys. Rev. D* 97 – 2018 - 073001; arXiv:1710.06326 [hep-ph].
- [12] M. Aglietta et al. The most powerful scintillator supernovae detector: LVD // *Nuovo Cimento A* 105 – 1992 – p. 1793
- [13] V. Beresnev. et al. 100-tons scintillation detector for the registration of the antineutrino fluxes from collapsing stars in our galaxy and for high energy muon interaction studies // *Proc. XVI ICCR, Kioto, 7 - 1979 – p. 297-298*
- [14] P. Antonioli et al., Snews: The supernova early warning system // *New journal of physics* 6 -2004 - 114.
- [15] B. P. Abbott et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // *Phys. Rev. Lett.* 119 – 2017 - 161101

- [16] A. Albert et al., Search for high-energy neutrinos from gravitational wave event GW151226 and candidate LVT151012 with ANTARES and IceCube // *The Astrophysical Journal Letters*, 850:L35 - 2017 – p.18
- [17] A. Albert et al. Search for high-energy neutrinos from gravitational wave event GW151226 and candidate LVT151012 with ANTARES and IceCube // *Phys. Rev. D* 96 – 2017 - 022005
- [18] A. Aab et al. Ultrahigh-energy neutrino follow-up of gravitational wave events GW150914 and GW151226 with the Pierre Auger Observatory // *Phys. Rev. D* 94 – 2016 - 122007
- [19] M. Agostini et al. A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector // *Astrophys. J.* 850 – 2017 - 21
- [20] K. Abe et al. Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with the GW170817 neutron-star merger // arXiv:1802.04379;
- [21] В. Б. Петков и др. Поиск на БПСТ электронных нейтрино от гравитационно-волновых событий // *Письма в ЖЭТФ* 107 – 2018 - №7, с. 418 – 421
- [22] M. Aglietta, Correlation analysis of the data recorded by the Baksan, Kamioka, and Mont Blanc detectors during SN 1987A // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1989 – p. 571 -584
- [23] A. E. Chudakov // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1989 – p. 571 - 577
- [24] G Rubtsov et al. Anisotropy in the mass composition from the Telescope Array Surface Detector data. // 36th ICRC Madison Wisconsin - 2019
- [25] D. Dzhappuev et al. Carpet-2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events // *JETP Letters* 109 – 2019 - № 4.
- [26] D. Dzhappuev et al. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 // *EPJ Web Conf.*, 207 (2019) 03004.
- [27] D. Dzhappuev et al. Carpet results on astrophysical gamma rays above 100 TeV // // 36th ICRC Madison Wisconsin, 2019.
- [28] H.P.Dembinski et al. Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers // *Proceedings of UHECR2018*
- [29] Н.С.Хаердинов, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Непрерывное свечение ночной атмосферы во время гроз и динамика её электрического состояния по данным вариаций космических лучей // *Изв. РАН. Сер. физ.* 83. – 2019 - №5 - С. 650-654
- [30] V. Sergeev et al. Magnetic effects of the substorm current wedge in a —spread-out wirel model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data // *J. Geophys. Res.*, 116 – 2011 - A07218, doi:10.1029/2011JA016471.
- [31] М.Н.Хаердинов. Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов, регистрируемых горизонтальной установкой // *Изв. РАН. Сер. физ.* 81. – 2017 - №2 - С. 246-249
- [32] Борог В.В. Основы мюонной диагностики: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008



**1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершённых НИОКР**

1. Avrorin et al., “BAIKAL-GVD: The New-Generation Neutrino Telescope in Lake Baikal”, Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 83 (2019) no.8, 921-922, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 83 (2019) no.8, 1016-1018, DOI: 10.3103/S1062873819080057.
2. Avrorin et al., “Spatial positioning of underwater components for Baikal- GVD”, EPJ Web Conf.207 (2019) 07004, 4pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920707004.
3. A.D. Avrorin et al., “Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope”, EPJ Web Conf. 207 (2019) 01003, 6pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920701003.
4. A.D. Avrorin et al., “A positioning system for Baikal-GVD”, <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
5. A.D. Avrorin et al. “Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Future”, <https://pos.sissa.it/358/1011/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019. 6.1. O.B.Суворова, “Baikal and GVD”, (invited), XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, NEUTEL2019, 18-22 March 2019, Venice, Italy, <https://indico.cern.ch/event/768000/timetable/#20190318>, DOI:10.5281/zenodo.2703478.
6. O.B.Суворова, “GVD in Lake Baikal: status of phase-1”, (invited), Seminar in CPPM - Centre de Physique des Particules de Marseille, and meeting on the research projects KM3Net and GVD-Baikal, 24 June 2019, Marseille, France.
7. O.B.Суворова, “Recent progress of the Baikal-GVD project”, (section), The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2019), 10-17 July 2019, Ghent, Belgium, <https://indico.cern.ch/event/577856/timetable/#20190710>.

**2. Долговременный набор и обработка данных, включая обмен данными и результатами их обработки в рамках международного научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория»**

8. Avrorin et al.,”Luminescence of water in Lake Baikal observed with the Baikal-GVD neutrino telescope”, EPJ Web Conf. 207 (2019) 09002,4pp. DOI:10.1051/epjconf/201920709002.
9. A.D. Avrorin et al.,” Environmental studies in Lake Baikal: basic facts and perspectives for interdisciplinary research”, EPJ Web Conf. 207 (2019) 09001, 6pp. DOI:10.1051/epjconf/201920709001.
10. A.D.Avrarin et al., “The inter-cluster time synchronization systems within the Baikal-GVD detector”, <https://pos.sissa.it/358/877/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
11. A.D Avrorin et al., “The Baikal-GVD detector calibration”, <https://pos.sissa.it/358/878/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
12. A.D Avrorin et al., “The optical noise monitoring systems of Lake Baikal environment for the Baikal-GVD telescope”, <https://pos.sissa.it/358/878/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
13. O.B.Суворова, “Status of Baikal-GVD and its multi-messenger program”, (invited), Cosmic Neutrinos and Multi-messenger Workshop “CosNuMM2019”, 27-30 November 2019, Shanghai, China, <https://indico-tdli.sjtu.edu.cn/event/43/timetable/#20191130>.

14. О.В.Суворова, “Baikal-GVD multi-messenger program”, (invited), Town Hall KM3Net meeting, 17-19 December 2019, Marseille, France, <https://indico.cern.ch/event/848390/timetable/#all.detailed>.

### **3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD**

15. Б.А.Шайбонов, “Status of Baikal-GVD”, “PAHEN 2019”, September 25-27, Berlin, Germany.

### **4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий**

16. A.D. Avrorin et al., "Data Quality Monitoring system in the Baikal-GVD experiment", <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
17. A.D. Avrorin et al., “Time calibration of the neutrino telescope Baikal-GVD”, EPJ Conf. 207 (2019) 07003, 6pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920707003.
18. L. Web Fajt, “The Baikal-GVD neutrino telescope: muon track events reconstruction”, (section), 36th ICRC 2019, July 24 - August 1st, Madison, WI, USA.

### **5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий**

19. A.D. Avrorin et al., “Baikal-GVD: first results and prospects”, EPJ Web Conf. 209 (2019) 01015, 6 pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920901015.
20. A.D. Avrorin et al., “Baikal-GVD: cascades”, EPJ Web Conf. 207 (2019) 05001, 4pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920705001
21. A.D. Avrorin et al., “Search for cascade events with Baikal-GVD”, <https://pos.sissa.it/358/873/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
22. М.Д.Шелепов, “A search for cascade events with Gigaton Volume Detector Baikal”, (постер). Международная школа-конференция «Evolution of galaxies and stars», Сочи, 15-27 Июля 2019. <https://basis-foundation.ru/summer-school/>
23. М.Д.Шелепов, ”A search for cascade events with Baikal-GVD”, (постер). Международная школа Понтекорво по нейтринной физике, Румыния, Синая, 1-10 Сентября 2019; <http://www.jinr.ru/posts/shkola-po-fizike-nejtrino-im-pontekorvo-v-rumynii/>

### **6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц**

24. О.В.Суворова, “BSM searches with Baikal”, (invited), 4th Uppsala workshop on Particle Physics with Neutrino Telescopes (PPNT2019), 7-9 October 2019, Uppsala, Sweden, <https://indico.uu.se/event/600/timetable/#20191007.detailed>.

- 7. Публикации по задаче «Измерение скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осциллирующих электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях, недоступных другим нейтринным экспериментам».**
25. Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Valery Gorbachev, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. «BEST potential in testing the eV-scale sterile neutrino explanation of reactor antineutrino anomalies». *Phys. Rev. D* 99, 111702.
26. Gavrin, V. N., «The history, present and future of SAGE (Soviet-American Gallium Experiment)», *Solar Neutrinos Proceedings of the 5th International Solar Neutrino Conference 5th International Solar Neutrino Conference, Dresden, Germany, 11 – 14 June 2018* (2019).
27. Гаврин В.Н., Горбачев В.В., Ибрагимова Т.В., Корноухов В.Н., Джанелидзе А.А., Злоказов С.Б., Котельников Н.А., Ижутов А.Л., Майнсков С.В., Пименов В.В., Борисенко В.П., Киселев К.В., Цевелев М.П. «О галлиевом эксперименте BEST-2 с источником Zn по поиску нейтринных осцилляций на короткой базе». *Ядерная Физика*, том 82, № 1 (2019), 78-84.
28. V V Gorbachev, V N Gavrin, T V Ibragimova, V N Kornoukhov and A A Shikhin. Experiment BEST-2 with a source of  $^{65}\text{Zn}$  on gallium target for the search of neutrino oscillations on a short baseline. *Journal of Physics: Conference Series* **1390** (2019) 012053, doi:10.1088/1742-6596/1390/1/0120531
29. J P Kozlova, E P Veretenkin, V N Gavrin, S N Danshin, T V Ibragimova, B A Komarov. Fabrication of reactor target from enriched  $^{50}\text{Cr}$  for artificial neutrino source. *Journal of Physics: Conference Series* **1390** (2019) 012100, doi:10.1088/1742-6596/1390/1/012100
- 8. Задача «Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания C-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».**
30. Study of Earth's Heat Flux by Means of Geoneutrino Detection I.R. Barabanov, L.B. Bezrukov, V.P. Zavarzina, I.S. Karpikov, A.S. Kurlovich, B.K. Lubsandorzhiyev, A.K. Mezhokh, V.P. Morgalyuk, V.V. Sinev. 2019. 5 pp. Published in *Phys.Atom.Nucl.* 82 (2019) no.1, 8-12 DOI: 10.1134/S1063778819010034
31. Л. Б. Безруков, В. В. Синева, Спектры CNO нейтрино и геонейтрино от  $^{40}\text{K}$  в детекторе Борексино, подготовлена для отправки в печать.
- 9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».**
32. N.Yu Agafonova, V.V Ashikhmin, E.A Dobrynina, R.I Enikeev, A.S Malgin, O.G Ryazhskaya, I.R Shakyrianova, V.F Yakushev for the LVD and the BUST Collaborations "The search for rare events using Large Volume Detector" ECRS 2018, *Journal of Physics: Conf. Series* 1181 (2019) 012059.

33. N Yu Agafonova et al. "Search for events in the LVD detector coinciding with gravitational signals from the collapse of close binary systems" *Journal of Physics: Conference Series* 1390 (2019) 012088
34. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenja, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov and A.F. Yanin. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1181, 012056, 2019.
35. V.B. Petkov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenja, Yu.F. Novoseltsev, R V Novoseltseva, P.S. Striganov and A.F. Yanin. Search for electron neutrinos associated with gravitational-wave events at the Baksan Underground Scintillation Telescope. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1181, 012058, 2019.
36. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, А.Н. Куреня, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, П.С. Стриганов, А.Ф. Янин. Поиск нейтринных вспышек на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе: 37 лет экспозиции. *Известия РАН. Серия физическая*, 2019, том 83, № 8, с. 1019–1022.
37. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А.Ф. Янин. Фон быстрых нейтронов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. *Известия РАН. Серия физическая*, 2019, том 83, № 8, с. 1023–1026.
38. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, М.М. Болиев, Е.А. Горбачева, М.М. Кочкаров, А.Н. Куреня, В.Б. Петков. Разработка новой системы сбора информации Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. *Известия РАН. Серия физическая*, 2019, том 83, № 5, с.702–705.
39. Yu.F. Novoseltsev, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenja, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin. Supernova neutrino burst monitor at the Baksan Underground Scintillation Telescope. *Astroparticle Physics* 117 (2020) 102404
40. V B Petkov, M M Boliev, I M Dzaparova, M M Kochkarov, A N Kurenja, Yu F Novoseltsev, R V Novoseltseva, P S Striganov and A F Yanin. 38 years of galactic observations in searching for neutrino bursts from core collapse supernovae with the Baksan Underground Scintillation Telescope. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020 (в печати).
41. V.B. Petkov, E.V. Bugaev, P.A. Klimai. Multimessenger search for evaporating primordial black holes. arXiv:1912.01317
42. I.M. Dzaparova, I.S. Savanov, V.B. Petkov, A.V. Sergeev, D.D. Dzhappuev, A.N. Kurenja, V.B. Puzin, E.A. Gorbacheva, O.I. Mikhailova, M.A. Nalivkin, S.A. Naroenkov, A.A. Shlyapnikov. Quick search for optical partners of bursts of very high energy gamma-ray radiation. *Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves"*, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 60 - 65. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Dzaparova.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Dzaparova.html)
43. Kochkarov M.M., Alikhanov I.A., Boliev M.M., Dzaparova I.M., Novoseltsev Yu.F., Novoseltseva R.V., Petkov V.B., Yanin A F. Fast neutrons in the Baksan Underground Scintillation Telescope: the background for core-collapse supernova searches. *Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves"*, Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 94 - 99. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Kochkarov.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Kochkarov.html)

44. A.N. Kurenja, I.M. Dzaparova, D.D. Dzhappuev, E.A. Gorbachev, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, V.S. Romanenko, A.F. Yanin. DAQ system for the complex of BUST – Andyrchy – Carpet-2 facilities. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 111 - 117. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Kurenja.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Kurenja.html)
45. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenja, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin. A search for neutrino bursts in the Galaxy with the Baksan Underground Scintillation Telescope; 38 years of exposure. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 153 - 160. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Novoseltseva.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Novoseltseva.html)
46. V.B. Petkov. The multi-messenger astronomy: experiments in the Baksan Neutrino Observatory. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 169 - 175. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Petkov.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Petkov.html)
47. R.V. Novoseltseva. Status of the experiment on the search of neutrino bursts with BUST. Particles and Cosmology: 16th Baksan School on Astroparticle Physics. Terskol, April 10-18, 2019. Устный доклад.
48. В.Б. Петков. Нейтринная астрофизика. Эксперименты в Баксанской нейтринной обсерватории. Двадцать пятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, г. Симферополь, 19 – 26 апреля 2019 г. Устный доклад (лекция).

**10. Задача «Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS».**

49. V B Petkov, M M Boliev, I M Dzaparova, M M Kochkarov, A N Kurenja, Yu F Novoseltsev, R V Novoseltseva, P S Striganov and A F Yanin. 38 years of galactic observations in searching for neutrino bursts from core collapse supernovae with the Baksan Underground Scintillation Telescope. J. Phys.: Conf. Ser., 2020 (в печати).

**11. Задача «Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».**

50. D. Dzhappuev et al. Carpet-2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events. // JETP Letters vol. 109, issue 4.
51. D. Dzhappuev et al. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 // EPJ Web Conf., 207 (2019) 03004.
52. D. Dzhappuev et al. Carpet results on astrophysical gamma rays above 100 TeV // // 36th ICRC Madison Wisconsin, 2019.

53. В.Б. Петков, Д.Д. Джаппуев, А.С. Лидванский, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А. Н. Куреня, О.И. Михайлова, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Измерение верхнего предела потока изотропного диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ на установке “Ковер-2”. Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 8, с. 1038–1041.
54. V.S. Romanenko, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, A.S. Lidvansky, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, K.V. Ptitsyna, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin. Limits on the isotropic diffuse gamma-ray flux between 100 TeV and 1 PeV: experiments Carpet-2 and Carpet-3. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 186 - 192. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Romanenko.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Romanenko.html)
55. A.S. Lidvansky for the Carpet-3 collaboration. Search for cosmic gamma rays of ultra-high energies with the Baksan air shower array. 16th International Conference on "Topics in Astroparticle and Underground Physics" (TAUP 2019), Toyama, Japan, 9-13 September 2019. Устный доклад.
56. Astapov I., Bezyazeev P, Borodin A.,....., Lubsandorzhiev B. et al., «Scintillation detectors for the TAIGA experiment» // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 2019. V.936. P.254. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.081>
57. L.G. Sveshnikova, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., B.K. Lubsandorzhiev et. al. First Season of Operation of the TAIGA Hybrid Cherenkov Array // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 962-966. DOI: 10.3103/S1062873819080379
58. V.V. Prosin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhiev B.K. et. al. Energy Spectrum of Primary Cosmic Ray According to Tunka-133 and TAIGA-HiSCORE EAS Cherenkov Light Data // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 1016-1019. DOI: 10.3103/S1062873819080343
59. E.B. Postnikov, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhiev B.K. et. al. Monte Carlo Simulation of the TAIGA experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 955-958. DOI: 10.3103/S1062873819080331
60. R.D. Monkhoev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhiev B.K. et. al. Search for Diffuse Gamma Rays Using Data of the Tunka-GRANDE Experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 959-961. DOI: 10.3103/S1062873819080306
61. N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhiev B.K. et. al. TAIGA: A Complex of Hybrid Systems of Cooperating Detectors for Gamma Astronomy and Cosmic Ray Physics in the Tunka Valley // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 951-954. DOI: 10.3103/S1062873819080100
62. N.M. Budnev, A. Chiavassa, O.A. Gress, ....., B.K. Lubsandorzhiev et al. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // Astroparticle physics. 117 (2020) 102406. / Available online 20 November 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.102406>
63. N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., B.K. Lubsandorzhiev et al. TAIGA – A hybrid array for high energy gamma astronomy and cosmic-ray physics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2019.04.067](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.067)
64. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev,....., B. Lubsandorzhiev et al. Cherenkov EAS arrays in the Tunka astrophysical center: from Tunka-133 to the TAIGA gamma and cosmic ray hybrid detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2019.01.056](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.056)

65. I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko....., B. Lubsandorzhev et al. Optimization of electromagnetic and hadronic extensive air showers identification using the muon detectors of the TAIGA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2018.12.045](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.045)
66. I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko....., N. Ushakov et al. TAIGA experiment: results and perspectives //Advances in Space Research. В печати.
67. Lubsandorzhev, I. Astapov, P. Bezyazeev, et al. The hybrid installation TAIGA: design, status and preliminary results // PoS (ICRC2019) 729.
68. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev,....., B. Lubsandorzhev et al. TAIGA:results and perspective // The European Physical Journal Conferences 207(5):03003 (2019).
69. V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev, ....., B. Lubsandorzhev et al. Cosmic Ray Energy Spectrum derived from the Data of EAS Cherenkov Light Arrays in the Tunka Valley // The European Physical Journal Conferences 210:01003 (2019).
70. D. Kostunin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy // arxiv:1903.07460

**12. Задача «Получение ограничений или поиск солнечных адронных аксионов».**

71. Z.A. Akhmatov, S.S. Berezin, Yu.M. Gavrilyuk et al., “Search for solar axions in BNO INR RAS”, The talk at the 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, Moscow, Russia, 22-28 August 2019. [http://lomcon.ru/?page\\_id=204](http://lomcon.ru/?page_id=204)

**13. Задача «Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ»**

72. H.P.Dembinski et al. Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers // Proceedings of UHECR2018
73. Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Степанов В.И., В.В., Щеголев и др. Отклик эндетекторов установки PRISMA-YBJ на землетрясения. Известия РАН, сер. Физическая, (2019), Т. 83, № 5, сс. 666–669.
74. Щеголев О.Б., Алексеенко В.В., Стенькин Ю.В. и др. Изучение массового состава космических лучей с энергией  $10^{15} - 10^{17}$  эВ в проекте PRISMA. Известия РАН, сер. Физическая, (2019), Т. 83, № 5, сс. 691–693.
75. Yu.V. Stenkin and O.B. Shchegolev. On the cosmic ray energy spectrum “knees”. Journal of Physics: Conf. Series 1181 (2019) 012021
76. Yu. Stenkin, et al. Response of PRISMA-YBJ detectors to Nepal earthquakes. Journal of Environmental Radioactivity 208–209 (2019) 105981 [Q1].
77. Ma X.H., Shchegolev O.B., Stenkin Yu.V. Cosmic ray mass composition analysis method to be used in the LHAASO-ENDA experiment. PoS(ICRC2019)431.
78. Xinhua Ma, Shu-Wang Cui, Bing-Bing Li, Shuai Liu, Cong Shi, Victor Alekseenko, Kirill Levochkin, Vladimir Rulev, Oleg Shchegolev, Yuri Stenkin, Vladimir Stepanov, Ya.V. Yanin, Chunhui Dong, Rong Zhou, Tian-Lu Chen, Danzengluobu and Mao-Yuan Liu. EAS Thermal Neutron Detector Array to Add into LHAASO. PoS(ICRC2019)345.

79. Yu. V. Stenkin. EAS Phenomenology and Cosmic Ray Spectrum Ground Based Measurements. *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 6, pp. 808–811.
80. Олег Щеголев «Спектр космических лучей в области энергий выше колена, измеренный на установках PRISMA-32 и PRISMA-YBJ». Зацепинские чтения 2019.
81. Стенькин Ю.В. «Старт эксперимента LHAASO». Зацепинские чтения 2019.
82. Yu.V. Stenkin. EAS phenomenology and cosmic ray spectrum ground based measurements. (2019), International Symposium ISCRA2019. Talk
83. Shchegolev Oleg. Primary cosmic ray energy spectrum above the "knee" measured with PRISMA-32 array. International Symposium ISCRA2019. Talk
84. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, A.V. Bulan, L. Bushama, Yu.V. Stenkin, K.O. Yurin. Study of EAS registered by the PRISMA-32 array, in the Cherenkov water calorimeter NEVOD.
85. Ma X.H., Shchegolev J.B., Stenkin Yu.V. Cosmic ray mass composition analysis method to be used in the LHAASO-ENDA experiment. (2019), ICRC2019. Talk. PoS(ICRC2019)431
86. Xinhua Ma, Jiancheng He, Yi Zhang,..., Yuri Stenkin,..., et al. EAS Thermal Neutron Detector Array to Add into LHAASO. (2019), ICRC2019. Talk. PoS(ICRC2019)345.
87. Ю.З. Афашоков, Д.Д. Джаппуев, Н.Ф. Клименко, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова, М.М. Хаджиев. Жидкостный сцинтилляционный детектор для эксперимента «Ковер-3». Приборы и техника эксперимента, 2019, № 1, с. 15–18.
88. V.B. Petkov. The Carpet-3 EAS array. *Particles and Cosmology: 16th Baksan School on Astroparticle Physics*. Terskol, April 10-18, 2019. Устный доклад.
89. V.S. Romanenko. VI<sup>th</sup> CNRS thematic School of Astroparticle Physics "PHYSICS and ASTROPHYSICS of COSMIC RAYS", November 25th – 30th, 2019, OHP Saint Michel l'Observatoire, France. Baksan EAS array Carpet-2 and Carpet-3 experiment. Устный доклад.

**14. Задача «Исследование зависимости спектра и состава космических лучей от направления на небесной сфере».**

90. G Rubtsov et al. [Anisotropy in the mass composition from the Telescope Array Surface Detector data](#). // 36th ICRC Madison Wisconsin, 2019.

**15. Задача «Разработка модели FANSY 2.0, воспроизводящей экспериментальные результаты при энергиях  $10^{11} - 10^{17}$  эВ во взаимодействиях адронов с нуклонами и моделирующей компланарную генерацию энергичных частиц при сверхвысоких энергиях»**

91. R.A. Mukhamedshin. FANSY 2.0: Monte Carlo tool for study of superhigh-energy cosmic-ray interactions. Proton-proton interactions. *European Physical Journal Plus* (2019) 134: 584. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12933-2>.

**16. Задача «Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам»**

92. R.A. Mukhamedshin. Does superhigh-energy cosmic-ray coplanarity contradict LHC data? *European Physical Journal C* (2019) 79: 441. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6931-0>.
93. R Mukhamedshin and T Sadykov. Do LHC data contradict superhigh-energy cosmic-ray coplanarity of most energetic particles? *J. of Physics: Conf. Ser.* (2019) 1181 012089.

**17. Задача «Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме непрерывной регистрации с чувствительностью  $10^{-19}$  Гц<sup>1/2</sup> к метрическим вариациям»**

94. V.N. Rudenko, Yu M. Gavriilyuk, A.V. Gusev, D.P. Krichevskiy, S.I. Oreshkin, S.M. Popov, I.S. Yudin. Gravitational wave detector OGRAN as multi-messenger project of RAS-MSU. Nov 9, 2019. 15 pp. Conference:C19-06-23.1 e-Print: arXiv:1911.03773 [physics.ins-det]
95. A.V. Gusev, V.N. Rudenko. Optimal Integration of the Components of the Global Network of Gravitational-Wave Antennas. 2019. 9 pp. Published in *Moscow Univ.Phys.Bull.* 74 (2019) no.2, 115-123, *Vestn.Mosk.Univ.Ser.III Fiz.Astron.* (2019) no.2, 24-31
96. Mickail Kuvshinskii, Sergey Oreshkin, Sergey Popov, Valentin Rudenko, Ivan Yudin, Valentina Azarova, Sergey Blagov. Tests of cryogenic Fabry-Perot cavity with mirrors on different substrates. Feb 9, 2019. 12 pp. Published in *Appl.Sciences* 9 (2019) 230 DOI: 10.3390/app9020230 e-Print: arXiv:1902.03452 [physics.app-ph]

**18. Задача «Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях на глубине порядка 1 км от поверхности земли. Исследование корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»**

97. Н.С.Хаердинов, А.С.Лидванский, М.Н.Хаердинов, Непрерывное свечение ночной атмосферы во время гроз и динамика её электрического состояния по данным вариаций космических лучей, *Изв. РАН. Сер. физ. Т. 83. № 5. С. 650-654 . 2019.*
98. Н.С. Хаердинов, Особенности ночных гроз на средних широтах во время магнитосферных суббурь, VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству». Нальчик 23–27 сентября 2019 г., Сборник трудов, стр. 127-129.
99. Н. С. Хаердинов / Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике конкретных гроз / Программа IV Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 3 – 7 июня 2019 г).
100. Н. С. Хаердинов, А. С. Лидванский, М. Н. Хаердинов / Характеристики непрерывного высотного свечения и вариации космических лучей во время ночных гроз по результатам серии наблюдений в Баксанском ущелье / Программа IV Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (Борок, 3 – 7 июня 2019 г).
101. Н.С. Хаердинов, Особенности ночных гроз на средних широтах во время магнитосферных суббурь, VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству». Нальчик 23–27 сентября 2019 г.

- 102.** Н.С. Хаердинов, Особенности ночных гроз на средних широтах во время магнитосферных суббурь, VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству». Нальчик 23–27 сентября 2019 г.