

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,
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 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 2020 год, 2 этап)
ФЦП

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

 Г.И. Рубцов
«31» января 2021 г.

Москва 2021 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



31.01.2021

подпись, дата

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

Исполнители:

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



31.01.2021

подпись, дата

О.Г. Рязжская
(раздел 9)

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.
РАН



31.01.2021

подпись, дата

Г.В. Домогацкий
(раздел 1,6)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

А.С. Лидванский
(раздел 18)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Л.Б. Безруков
(раздел 8, 13, 17)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

А.М. Гангапшев
(раздел 12)

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.
РАН

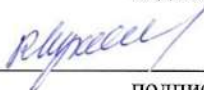


31.01.2021

подпись, дата

В.Н. Гаврин
(раздел 7)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Р.А. Мухамедшин
(раздел 15, 16)

Д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Ю.В. Стенькин
(раздел 13)

Д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



31.01.2021

подпись, дата

С.В. Троицкий
(раздел 11, 13)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 95 с., 34 рис., 3 табл., 8 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}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 2020 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 2020 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; комплектацию и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовку инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал; транспортировку элементов

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

В результате в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2020 года были установлены 2 новых кластера и запущен в эксплуатацию телескоп из 7 кластеров с эффективным объемом 0,35 км³. 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 км³.

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 2020 году в состав телескопа были установлены 3 полупроводниковых импульсных лазера для межкластерной калибровки оптических модулей, доработаны системы внутрикластерной и межкластерной синхронизации до требуемой точности. В части разработки программного обеспечения введены в эксплуатацию работающие «online» 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 «offline» обработки данных пакета программ BARS: введены программы автоматической обработки первичных данных, разработан блок программ по автоматическому восстановлению каскадов и траекторий мюонов. Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» по программе «multi-messenger». Разработки в рамках задачи 2 обеспечили в 2020 году непрерывный набор и накоплений данных телескопа Baikal-GVD из 7 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, 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 7 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 offline 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, 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 2020 году выполнен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, накопленных в 2016, 2018 и в 2019 году. В результате обработки и анализа был сформирован банк экспериментальных данных, содержащий 6270 события и удовлетворяющих критериям отбора каскадов с энергией выше 10 ТэВ с множественностью числа сработавших оптических детекторов телескопа больше девяти. 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 двенадцать событий. В результате дополнительного анализа, подавляющего фоновые события от атмосферных мюонов, было выделено шесть событий – первых кандидатов на роль нейтрино астрофизической природы, зарегистрированных в экспериментах на нейтринных телескопах, расположенных в Северном полушарии.

В целом 2020 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 2020 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 2020 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 2020 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}Cr источником. Выполнено 10 экспозиций источником двухзонной галлиевой мишени и 10 извлечений из каждой зоны мишени. В марте 2020 г. завершены измерения 20 извлечений, выполнена обработка и предварительный анализ набранных данных.

В течение отчетного периода проводились работы по оценке вкладов систематических неопределенностей в результаты измерений. Выполнены калибровки всех систем ГГНТ. С применением изотопов ^{37}Ar и ^{71}Ge измерены характеристики счетных систем и пропорциональных счетчиков, использовавшихся в эксперименте.

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.

Для выбора оптимальной конфигурации Большого Баксанского Нейтринного Телескопа было проведено моделирование методом Монте-Карло.

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 28 лет работы (1992 – 2020), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 12.2 г. на 90% уровне достоверности. По данным детектора АСД за 43 года работы (1977 – 2020) получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.56 г. на 90% уровне достоверности. Также проводился поиск совпадающих одиночных импульсов в детекторах БПСТ и LVD во время регистрации гравитационного сигнала от источника GW170817.

По информации БПСТ за 2020 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации составило 332.5 суток – 90.8 % от

календарного времени за период с 01 января 2020 по 31 декабря 2020 года. Чистое время набора по данной задаче (с учетом мертвого времени телескопа) составило 326.7 суток.

Создан архив экспериментальных данных установок за 2020 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.

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2020 году (с 01.01.2020 по 31.12.2020) чистое время регистрации по нейтринной программе составило 8314.3 часа (95% от календарного времени), было зарегистрировано 52 мюонных нейтрино из нижней полусферы. Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года по 31.12.2020 составляет 300759.3 часа (34.33 года, 81.7 % от календарного). Всего за это время было зарегистрировано 1810 нейтрино.

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 Брукгейвенскую 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.

Проводится работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS, которая в 2020 году переходила на новый формат (SNEWS2.0). В настоящее время ведется тестирование соединения со SNEWS2.0.

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.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на ливневой установке “Ковер-2” по всем физическим задачам. Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Чистое время набора информации составляет 91% календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ, 82% для регистрации мюонной компоненты ШАЛ на Мюонном Детекторе (МД) и 98% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

Выполнено прецизионное измерение энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне 1015 -1018 эВ на черенковской установке Tunka-133 экспериментального комплекса TAIGA. На установке TAIGA-HiSCORE измерение энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне 2×10^{14} -1016 эВ. Данные установок Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE хорошо согласуются между собой и с данными других экспериментов от прямых спутниковых и баллонных экспериментов до гигантских установок по изучению космических лучей ультравысоких энергий. Успешно произведен физический запуск второго узкоугольного атмосферного черенковского телескопа изображения TAIGA-IACT. Зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от Крабовидной туманности со статистической значимостью более 6σ и измерен их энергетический спектр. Зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от внегалактического источника блазара Mrk421 со статистической значимостью более 5σ .

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}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) на ядрах ^{83}Kr в мишени (рабочий газ пропорционального

счетчика). Таким же образом могут регистрироваться аксионы с энергией 9.4 кэВ, рожденные в результате эффекта Примакова в недрах Солнца.

Для регистрации γ -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. На данный момент набрана статистика за ~ 1000 дней живого времени измерений. Измерения продолжаются. Обработка данных еще не завершена.

В качестве лучшей альтернативы рассматривается возможность использования ядра ^{57}Fe вместо ^{83}Kr . В этом случае чувствительность детектора с данным изотопом с той же массой мишени будет на порядок выше. В качестве альтернативы рассматриваются монокристаллы твердого раствора GaS:Fe с содержанием железа до 5%. Имеются образцы кристалла твердого раствора GaS:Fe. На данный момент ведутся работы по изучению его характеристик.

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, LHAASO.

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. Эксперимент по изучению космических лучей SUGAR (Sydney University Giant Air-shower Recorder) работал в 1968-1979 гг. Уникальность эксперимента состояло в том, что он включал в себя решетку мюонных детекторов общей площадью 100 кв. км. Сравнение спектров полученные по данным SUGAR и Pierre Auger Observatory (Auger) позволяет восстановить эмпирическую зависимость количество мюонов в вертикальном ливне от первичной энергии в диапазоне от 10^{17} до 10^{18} эВ. Эта зависимость сравнивалась с предсказаниями моделей адронных взаимодействий QGSJET-

П-04, EPOS-LHC и SIBYLL-2.3c и тем самым определялось, что в данных моделей возникает недостаток мюонов по сравнению с наблюдаемыми данными.

Работы по созданию высокогорной установки нового типа в 2020 г. проводились в соответствии с планом работ, но удаленно. Из-за пандемии нам не удалось организовать поездку на место проведения эксперимента (КНР). Был сделан упор на работы, которые можно проводить удаленно. Были выполнены методические работы по тестированию эн-детекторов в реальных условиях высокогорья, отладка системы сбора данных и он-лайн программы, математическое моделирование эксперимента, анализ полученной информации.

На прототипе PRISMA-32 получен предварительный результат по измерению энергетического спектра космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ. Проводился непрерывный мониторинг природного потока тепловых нейтронов с помощью эн-детекторов в различных геологических и геофизических условиях.

Эксперимент LHAASO, также находится в процессе создания, но не смотря на это, там идет непрерывный набор экспериментальной информации (сначала на 1/4, затем на 1/2 работающих детекторов) и там уже получены выдающиеся результаты с области гамма-астрономии сверхвысоких энергий: измерен энергетический спектр гамма-квантов от источника в Крабовидной туманности в области 100 – 1000 ТэВ, и обнаружен новый источник гамма-квантов в окрестности созвездия Лебедь с энергиями выше 1 ПэВ – ПэВатрон в нашей галактике. Благодаря очень высокой светосиле установки на ней уже открыты около 10 ранее неизвестных источников в нашей галактике.

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 направлениях прихода космических лучей по данным эксперимента Telescope Array. Обнаружение значительной дипольной структуры в направлениях прихода космических лучей энергии выше 8 ЭэВ установкой Pierre Auger Observatory (Auger) даёт мотивацию проверить данный результат с помощью данных эксперимента Telescope Array. В данной работе используются данные, собранные с помощью решетки наземных детекторов эксперимента Telescope Array в течении 11 лет. По этим данным, дипольная структура в проекции прямого восхождения соответствует

амплитуде $3,3 \pm 1,9\%$ и фазе $131^\circ \pm 33^\circ$. Соответствующий верхний предел амплитуды с доверительной вероятностью 99% составляет 7,3%. На текущем уровне статистики подобранный результат совместим как с изотропным распределением, так и с дипольной структурой, сообщенной Auger.

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) от первичных космических частиц. Информация о фрагментационной области во взаимодействиях адронов (мезонов и нуклонов) с нуклонами и ядрами имеется только при энергиях ниже $\sqrt{s} < 63$ ГэВ. Проведена дальнейшая отработка программного пакета FANSY 2.0, с упором на моделирование взаимодействий мезонов. Как результат, из всех моделей, применяемых в настоящее время для моделирования ШАЛ, FANSY 2.0 наиболее детально воспроизводит широкий набор экспериментальных данных, полученных как на LHC при сверхвысоких энергиях по генерации различных вторичных частиц в разных кинематических областях, так в экспериментах при низких энергиях в протон- и мезон-протонных взаимодействиях во всей области значений $x_F < 1$, информация по которой является наиболее информативной для расчетов развития ШАЛ.

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.

Показано, что в рамках модели FANSY 2.0 «ridge» эффект, который не объясняется ни одной из существующих теоретических моделей, является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

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

Твердотельная гравитационная антенна с оптоакустическим способом снятия сигнала (ОГРАН) расположена в подземной лаборатории на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Проектная чувствительность ОГРАН позволит зарегистрировать коллапс сверхновой звезды в нашей Галактике. В 2020 году выполнялась модернизация опто-акустических узлов антенны с целью устранения недостатков препятствующих достижению проектных параметров по чувствительности антенны, составляющей 10^{-19} Гц^{1/2} по метрическим возмущениям. Также была организована совместная работа ОГРАН и подземного скинтилляционного телескопа БПСТ.

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.

В 2020 г., используя ранее разработанный метод диагностики электрического состояния грозовой атмосферы по вариациям вторичных частиц космических лучей, регистрируемых установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН, обнаружено явление взаимного влияния магнитосферной бури и грозовой активности. Проведен детальный анализ грозового события 24-25 июля 2014 г., когда свечение ночного неба над установкой (наблюдаемое на расстоянии 75 км, село Хасанья на окраине Нальчика) было зарегистрировано на фоне магнитосферной бури.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	16
ВВЕДЕНИЕ.....	19
1. Развертывание нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD в соответствии с результатами завершённых НИОКР (Задача №1).....	32
1.1. Методология выполнения исследования	32
1.2. Результаты исследований.....	32
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)	42
2.1. Методология выполнения исследования	42
2.2. Результаты исследований.....	42
2.3. Применение и значимость результатов исследования.....	45
3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD (Задача №3)	46
3.1. Методология выполнения исследования.....	46
3.2. Результаты исследований.....	46
3.3. Применение и значимость результатов исследования	49
4. Совершенствование и специализация систем анализа и обработки данных для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий (Задача №4).....	50
4.1. Методология выполнения исследования	50
4.2. Результаты исследований.....	50
4.3. Применение и значимость результатов исследования	53
5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий (Задача №5)	54
5.1. Методология выполнения исследования	54
5.2. Результаты исследований.....	54
5.3. Применение и значимость результатов исследования.....	56
6. Поиск частиц темной материи и изучение астрофизических проявлений других расширений Стандартной модели элементарных частиц (Задача №6)	56
6.1. Методология выполнения исследования	56
6.2. Результаты исследований.....	56

6.3. Применение и значимость результатов исследования	57
7. Второй и третий этапы эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) (Задача № 7)	57
7.1. Измерения с изотопом ^{37}Ar объёмных эффективностей пропорциональных счётчиков, использовавшихся в измерениях BEST.	59
7.2. Измерения эффективностей счётчиков в пиках распадов ^{71}Ge и времен нарастания фронта импульсов от распадов ^{71}Ge	60
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)	62
9. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD (Задача № 9)	63
9.1. Анализ данных детекторов LVD и АСД.....	63
9.2. Анализ данных детектора БПСТ.....	66
10. Организация передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую сеть SNEWS (Задача №10).....	68
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)	68
11.1. Анализ данных, полученных на установке Ковер-2	68
11.2. Участие в работе международной коллаборации TAIGA	70
12. Получение ограничений или обнаружение солнечных адронных аксионов (Задача №12) 73	
13. Изучение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий от 1 ПэВ до 100 ЭэВ (Задача №13).....	74
13.1. 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).....	75
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).....	76
16. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по экспериментальным азимутальным эффектам, наблюдаемым в экспериментах на БАК и в космических лучах (Задача № 16).....	76

17. Проведение работ по запуску оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режим непрерывной регистрации с чувствительностью 10^{-19} Гц ^{1/2} к метрическим вариациям (Задача № 17).....	77
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).....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	89
ПУБЛИКАЦИИ.....	90

ВВЕДЕНИЕ

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

В 2020 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, Baikal-GVD в озере Байкал и проект KM3Net в Средиземном море, который находится в начальной стадии своего развития.

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 2020 г. развернула в озере Байкал и запустила в режим набора данных 7 кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. С их вводом эффективный объем телескопа достиг значения 0.35 км^3 в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Установка содержит в своем составе 2016 глубоководных детекторов черенковского света на основе больших фотоэлектронных умножителей и работает в режиме постоянной регистрации и накопления данных. Получаемые данные о потоке атмосферных мюонов и нейтрино находятся в хорошем соответствии с ожидаемыми. Темп счета первых событий от нейтрино высоких энергий находится в согласии с данными о потоке астрофизических нейтрино, полученными на антарктическом нейтринном телескопе IceCube. Совместная работа этих двух крупнейших телескопов Северного и Южного полушария позволяет вести обзор всего неба в нейтринном излучении, осуществлять поиск астрофизических источников на всей небесной сфере.

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

Набор, обработка и накопление данных, получаемых в результате регистрации телескопом событий, вызванных потоками астрофизических нейтрино высоких энергий, самая главная и необходимая задача для решения фундаментальных задач астрофизики из-за крайне малого количества достоверных фактов их восстановления на превосходящем фоне, вызываемого потоками нейтрино атмосферного происхождения. Для решения практически всех научных задач (поиск астрофизических источников, изучение диффузных потоков нейтрино, построение нейтринной карты неба и др.) требуется накопление данных в течение нескольких лет и десятилетий. Задача более быстрого накопления данных и повышения их достоверности решается с помощью объединения всех действующих крупномасштабных нейтринных телескопов в единую мировую сеть, начало создания которой было положено подписанием 15 октября 2013 года полномочными представителями 4 научных коллабораций: IceCube, ANTARES, KM3NeT, Baikal-GVD меморандума о создании «Глобальной нейтринной сети» (GNN) как первого этапа по созданию «Глобальной нейтринной обсерватории» (GNO). Конечной целью кооперации было заявлено создание единой регистрирующей инфраструктуры из находящихся на разных континентах нейтринных телескопов сопоставимых масштабов. 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 и обмена полученными результатами.

Интенсивный обмен результатами работ и данными производится на ежегодных совещания (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 offline 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. Для выполнения больших объемов вычислительных операций были использованы вычислительная система ИЯИ РАН (сервер и накопитель данных на 50 терабайт), созданные за счет обновления приборной базы, а также мощности вычислительных систем, предоставленные 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 км³. 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 2020 году чувствительность, достигнутая на телескопе из 7 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 скопления 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 скопления. 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 [5] 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}Cr предложен Баксанский эксперимент по поиску на очень коротких расстояниях осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на двойной металлической Ga мишени (BEST) 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».

Конфигурация ББНТ определяется формой емкости сцинтиллятора в телескопе. Рассматривалось три варианта: цилиндр, сфера и две полусферы с цилиндром между ними ("пилюля"). Изготовление цилиндра проще, чем сферы. Вариант "пилюли", промежуточный вариант, мог иметь определенные преимущества. С другой стороны, восстановление энергии для сферы проще, чем для двух других опций, что в конечном счете ведет к улучшению разрешения. От цилиндрического варианта было решено отказаться из-за высокой неоднородности светосбора.

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 ~30 лет. Со времени предыдущей вспышки Сверхновой в нашей галактике прошло уже более 300 лет, а SN1987A вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке в 1987 году. В 2020 году событий, связанных со взрывами Сверхновых звезд обнаружено не было. 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 2020 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 2020 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 2020 году продолжала работать система оперативного оповещения членов коллаборации БПСТ о нейтринной вспышке. Вся информация полученная с БПСТ поступает в оперативную память online компьютера. Каждые 15 минут (в 0, 15, 30 и 45 минут каждого часа) эта информация записывается в файл, номер которого однозначно связан с календарным временем. Через 20 сек этот файл отправляется на сервер БНО и через 4 минуты начинается обработка информации, в том числе, по программе поиска нейтринных вспышек. Этот процесс занимает около 1 минуты. Если обнаружено событие с множественностью ≥ 6 как детекторе Д1, так и в детекторе Д2, то генерируется рассылка информации об этом событии сотрудникам БПСТ, на мобильные телефоны (СМС) и электронную почту. Рассылка алерта внутри коллаборации проходит без сбоев. Проводится работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS, которая в 2020 году переходила на новый формат (SNEWS2.0). В настоящее время ведется тестирование соединения со SNEWS2.0.

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 π -мезонов. Эти мезоны, в свою очередь, рождаются в адронных и фотоадронных процессах, которые всегда сопровождаются рождением нейтральных π^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.

Экспериментальный комплекс TAIGA состоит из широкоугольных черенковских детекторов ШАЛ Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сети узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT и сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE. Черенковский детектор Тунка-133 был создана для исследования космических лучей в области энергий 10^{15} - 10^{18} эВ. Установка TAIGA-HiSCORE имеет порог по энергии 40 ТэВ для гамма-квантов и 80 ТэВ для протонов. Создаваемая сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT будет состоять из 10-12 телескопов. В настоящее время действуют два таких телескопа. Телескопы нацелены на регистрацию гамма-квантов от локальных источников. Энергетический порог телескопов ~ 2 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 π^0 -мезона:

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

где m_π и f_π – 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:

1. Поиск монохроматических аксионов с энергией 9.4 кэВ, излучаемых в M1-переходе в ядрах ^{83}Kr на Солнце.

2. Поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ рожденных в результате эффекта Примакова. в недрах солнца. В этом случае спектр излучаемых Солнцем аксионов непрерывный, с пиком в области ~ 3 кэВ.

На Земле аксионы могут быть обнаружены в реакции резонансного поглощения ядром ^{83}Kr путем регистрации частиц (γ - и рентгеновских квантов, конверсионных и оже-электронов), возникающих при разрядке возбужденного ядерного уровня. Вероятность испускания и последующего поглощения аксионов в первом случае зависит только от константы связи с нуклонами, которая является наименее модельно-зависимой и пропорциональна $(g_{AN})^4$. Во втором случае от произведения констант связи аксионов с фотонами и с нуклонами во второй степени.

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 данном проекте является измерение энергетического спектра и химического состава космических лучей в области т. н. «излома» спектра в ПэВной области энергий. Предложенные нами проекты PRISMA и PRISMA-LHAASO (или 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. Эн-детекторы измеряют две компоненты ШАЛ – электронную и адронную по всей площади установки. Кроме того, продолжают работу прототипы установки как в горах, так и в Москве.

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: неизвестны 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 ЛНС, в настоящее время не существует. Это связано с тем, что эксперименты на ЛНС 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 ~ 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^{1/2} к метрическим вариациям»

В 2020 году был реализован модернизированный вариант комбинированного оптоакустической детектора гравитационного излучения (ОГРАН). Эта подземная

установка, расположенная в Баксанской Нейтринной Обсерватории, предназначена для поиска коллапсирующих звезд в Галактике совместно с нейтринным телескопом БПСТ. Оба инструмента обладают чувствительностью, позволяющей регистрировать коллапсы в нашей Галактике как редкие явления со средней скоростью 0,03 события в год. Наблюдения проводятся в форме непрерывного синхронного мониторинга астрофизического фона по обоим каналам регистрации. Жесткие требования предъявляются к системам удержания рабочих режимов обеих установок. Проблема оказывается нетривиальной для гравитационного детектора ввиду сложности его систем автоматического регулирования и тонкой настройки рабочей точки. По этой причине методика и техника удержания ОГРАН в режиме мониторинга требует отработки и детального описания, представленного в отчете ниже.

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»

В 2020 г., используя ранее разработанный метод диагностики электрического состояния грозовой атмосферы по вариациям вторичных частиц космических лучей, регистрируемых установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН, обнаружено явление взаимного влияния магнитосферной бури и грозовой активности. Проведен детальный анализ грозового события 24-25 июля 2014 г., когда свечение ночного неба над установкой (наблюдаемое на расстоянии 75 км, село Хасанья на окраине Нальчика) было зарегистрировано на фоне магнитосферной бури. Для более глубокого анализа электромагнитных эффектов были дополнительно привлечены данные измерений вариаций геомагнитного поля, произведённые на территории БНО и в удалении на 70 км в северо-западном направлении (Верхнекубанский полигон ВСЕГИГГЕО, пос. Эльбрусский, N43.55° E42.13°) силами Северокавказской геофизической лаборатории ИФЗ. Измерения магнитного поля проводились на идентичном оборудовании, выполненном по единой технологии. Этот факт позволил измерить локальное возмущение магнитного поля, на масштабе ~ 100 км, вызванное локальными токами. т. е. в системе литосфера - тропосфера – стратосфера - ионосфера в районе БНО. Установлено, что во время магнитосферных суббурь малой мощности, на предварительной стадии и в начале фазы развития, возможно проникновение магнитосферно – ионосферных возмущений на средние широты (~40о с. ш.) над грозовыми очагами. Этот эффект проявляется в виде диффузного свечения типа «полярное сияние» яркостью ~3·10⁻⁴ кд/м² и локальных возмущений электрического поля

с характерной разностью потенциалов в тропосфере ± 100 МВ. Зарегистрировано локальное магнитное возмущение (~ 1 нТл), соответствующее возникновению локального вертикального тока в атмосфере, максимум которого совпал с началом взрывной фазы зарождения суббури.

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

1.1. Методология выполнения исследования

В 2020 году было продолжено развертывание новых кластеров телескопа и развитие инфраструктуры, обеспечивающей возрастающий с каждым годом объем выполняемых исследований и работ. Работы по развертыванию 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

В 2020 году сделан очередной шаг в создании Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD - установлены два новых кластера. 10 апреля 2020 года в режим непрерывного набора данных введено всего 7 кластеров, а эффективный объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино вырос до $\sim 0,35$ кубического километра.

Телескоп из 7 кластеров Baikal-GVD состоит из 56 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 1).

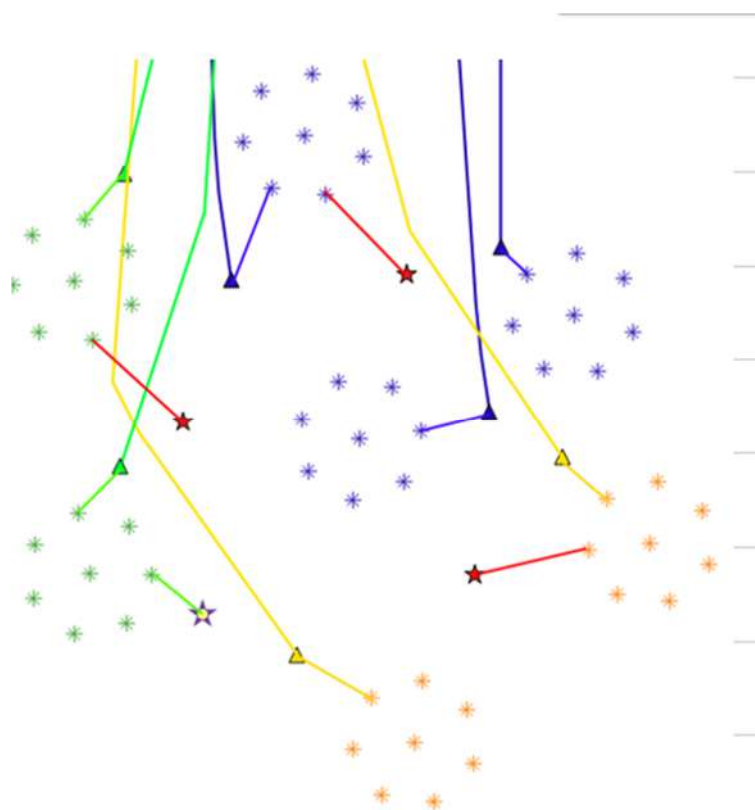


Рис. 1. Схема расположения 7 кластеров нейтринного телескопа Baikal-GVD, прокладки кабелей и положения глубоководных станций с лазерами. Два новых кластера обозначены желтым цветом. Звездочки между кластерами – лазерные глубоководные станции

Дополнительно, к двум новым кластерам в 2020 году были установлены три технологические гирлянды, оснащенные пятью калибровочными лазерными источниками света, расположение которых указано на рисунке 1. Выбранная конфигурация расположения лазеров обеспечивает возможность калибровки всех каналов кластера.

Развертывание новых кластеров телескопа, регламентные работы на установленных ранее кластерах, прокладка кабелей производится с ледового покрова озера Байкал. С этой целью в 4 км от берега в районе 106 км КБЖД разбивается ледовый лагерь, оборудованный средствами ведения глубоководных работ, техническими помещениями, средствами автономного электропитания и бытовыми устройствами (рисунок 3).



Рис. 2. Центр кластера



Рис. 3. Ледовый лагерь 2020

Во время зимней экспедиции 2020 было проложено два донных опто-электрических кабеля длиной 7 км каждый, обеспечивающих электропитание, сбор данных и управление двумя новыми кластерами. В этот сезон при монтаже кластеров и прокладке кабелей пришлось преодолевать исключительные трудности, созданные природой. Впервые все пространство над телескопом было покрыто ледяными торосами, препятствующими проходу техники и увеличивающие толщину ледяного покрова (рисунок 4). Для решения

проблемы во время экспедиции был собран планировщик на базе трактора, срезавший торосы и прокладывающий пути прохода техники и персонала.



Рис. 4. Торосы на месте разворачивания кластера

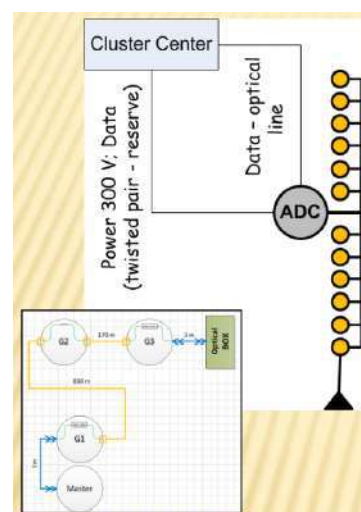


Рис. 5. Схема подключения оптических модулей

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.

Экспериментальная гирлянда предназначена для исследования возможности снижения энергетического порога регистрации Baikal-GVD. Скорость передачи данных с экспериментальной гирлянды составляет 1 Гбит/с. Одновременно с увеличением пропускной способности системы передачи информации на экспериментальной гирлянде исследуются возможности on-line обработки и фильтрации данных под водой, на уровне модифицированной на базе FPGA Zynq платы АЦП. Увеличение производительности процессора и объема памяти платы позволяет реализовать гибкую систему формирования триггера, ориентированную под конкретные физические задачи. В настоящее время апробируется версия триггера, настроенного на регистрацию медленных монополей;

Для повышения эффективности регистрации нейтринных событий была установлена дополнительная экспериментальная гирлянда (рисунок 5), использующая для обмена данными глубоководные оптоволоконные кабельные коммуникации. Экспериментальная гирлянда предназначена для исследования возможности снижения энергетического порога регистрации Baikal-GVD. Скорость передачи данных с экспериментальной гирлянды составляет 1 Гбит/с. Одновременно с увеличением пропускной способности системы передачи информации на экспериментальной гирлянде.

В экспериментальной гирлянде использована стандартная схема подключения к

коммуникациям телескопа. Состоит гирлянда из 12 оптических модулей (стандартной секции телескопа) и модуля секции, в который поступают аналоговые сигналы от оптических модулей, преобразуются в оптические сигналы в цифровом коде и передаются в центр кластера по показанной на рисунке схеме. Центр кластера связан с береговым центром опто-электрическим кабелем длиной 7 км, по которому данные поступают в береговой центр сбора и обработки данных.

Значительный объем подготовительных и регламентных работ во время зимней экспедиции 2020 года был проведен по ремонту и модернизации ранее установленных кластеров. Одной из причин выхода из строя линий электропитания и подводной электроники телескопа являются грозовые разряды – молнии. На рисунке 6 показан такой разряд в воду в непосредственной близости от телескопа в августе 2020 г., который вывел из строя центр кластера телескопа.



Рис. 6. Грозовой разряд в воду озера Байкал в непосредственной близости от нейтринного телескопа

Значительный объем исследований в 2020 году был проведен для повышения точности синхронизации работы всех устройств внутри каждого кластера, так и между кластерами. Принцип работы кластера заключается в следующем: 12-ти канальный модуль управления (ЦМ) имеет функцию гибкой настройки условий срабатывания. Обычно это превышение электрическим сигналом с фотометрического тракта заданного порога на заданном числе каналов АЦП в определенном временном окне. При выполнении триггерных условий ЦМ

формирует сигнал запроса, который поступает в центр кластера. На основании анализа сигналов запросов от всех гирлянд в центре кластера формируется общий триггер, который транслируется на все секции кластера. Этот сигнал инициирует считывание данных со всех каналов АЦП, которые передаются по протоколу TCP/IP на береговой сервер.

Использование единого триггера позволяет синхронизировать работу всех секций кластера, формируя для них единую временную шкалу. В свою очередь, для объединения единой временной шкалой общих триггерных сигналов с каждого кластера используется специально разработанная система меж-кластерной синхронизации. Внутрикластерная синхронизация базируется на использовании двух независимых систем: Synchronization System of Baikal neutrino Telescope (SSBT) производства МГУ, специально разработанная для данной установки и White Rabbit (WR), разработанная в CERN и используемая во многих экспериментах. Каждая из систем независимо друг от друга присваивает триггерным сигналам разных кластеров временные метки от собственных часов, позволяя тем самым осуществлять взаимный контроль их работы. Обе системы были внедрены в состав телескопа в 2018 году, но только в 2020 году была достигнута необходимая точность и согласованность двух систем.

SSBT представляет собой сеть узлов - точек синхронизации (Cluster Synchronization Node), соединенных с общим центром (Host+Megahost) оптоволоконными линиями связи. SSBT Host является раздающим устройством, а часы в каждом узле синхронизированы с Host+Megahost по специальному протоколу через оптоволокно. Управление устройствами осуществляется через общую сеть Ethernet телескопа GVD. Задающий генератор представляет собой высокоточный рубидиевый осциллятор с термостабилизацией.

Система синхронизации WhiteRabbit (WR) проекта Baikal-GVD представляет собой сеть узлов SPEC (Simple PCIe FMC carrier) объединенных в общую сеть Ethernet оптоволоконными каналами и специализированным коммутатором White Rabbit Switch (WRS). Синхронизация часов в каждом устройстве сети WR происходит посредством специальных синхронизирующих пакетов информации. WRS имеет возможность подключения внешнего источника точного времени, например GPS тайм-сервера, и может быть назначен ведущим устройством для всей сети.

Узлы синхронизации CSN и WR SPEC расположены внутри наконечника глубоководного кабеля – в герметичном стальном корпусе. Наконечник имеет герметичный ввод для глубоководного берегового кабеля, а также несколько глубоководных разъемов для подключения питания кластера, гигабитного Ethernet и триггерных сигналов. Оборудование наконечника включает в себя гигабитный оптический коммутатор Ethernet, diode coupler,

CSN, WR SPEC, micro PC Raspberry Pi, Relay Board and power supply converters. Электронная схема наконечника представлена на рисунке 7.

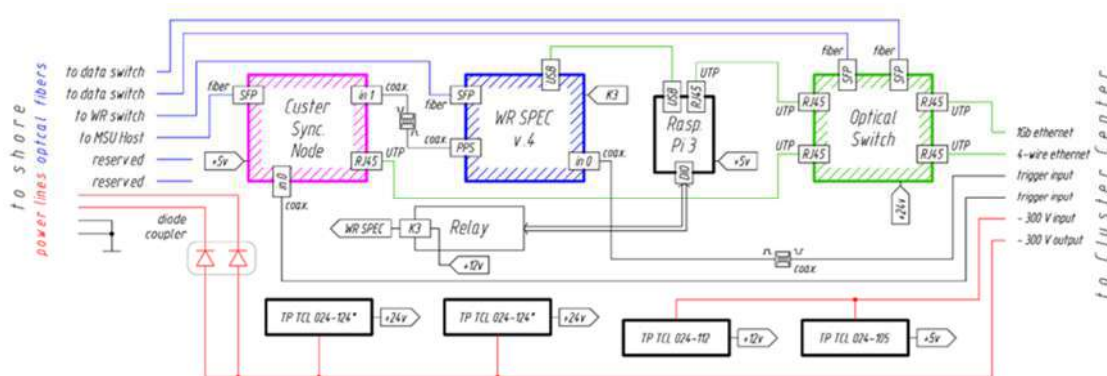


Рис. 7. Электронная схема наконечника глубоководного кабеля

WR SPEC имеет пятиканальную плату DIO. 4 канала работают в режиме входов порогового детектора. Если синхронизация с ведущим устройством (WRS) осуществлена, то временная метка передается UDP-пакетом при условии превышения заданного порога входным триггерным сигналом. Пятый канал работает в режиме выхода. На нем при наличии синхронизации с ведущим устройством каждую секунду формируется сигнал PPS (pulse per second), используемый для взаимного контроля двух систем синхронизации.

CSN системы SSBT также представляет собой 4-х канальный пороговый детектор с внутренними часами, синхронизированными с ведущим устройством Host+Megahost. Тактовая частота 100 MHz и секундные метки передаются по оптическому волокну от ведущего устройства. Система SSBT также имеет функцию общего старта и может быть инициализирована в начале каждой серии набора данных. Микрокомпьютер используется для управления блоком реле, устройством WR SPEC через консольный порт и оптическим коммутатором MOXA. Блок реле используется для независимого сброса питания систем синхронизации.

Также стоит отметить, что имеется возможность связи временных меток с систем SSBT и WR за счет сигнала PPS, генерируемого раз в секунду платой DIO WR SPEC и подающегося на вход одного из каналов CSN.

Основным параметром системы синхронизации является точность измерения относительного времени между событиями, регистрируемыми разными кластерами. Эта точность определяется рядом факторов таких как: точность временной привязки к сигналу общего триггера кластера, используемого для формирования временной отметки (≤ 1 нс);

временное разрешение системы синхронизации (WR ~ 1 нс, SSBT ~ 10 нс с возможностью улучшения до 5 нс), стабильность задающего генератора.

В обеих системах используются собственные задающие генераторы. В системе SSBT это высокоточный термостабилизированный рубидиевый генератор. В системе WR используется внутренний генератор в режиме “free running master”. Кроме того, предусмотрен режим “grand master” с возможностью подключения внешнего источника точного времени с задающим генератором.

Сбор данных с систем синхронизации осуществляется двумя независимыми серверами. Для SSBT – это основная программа сбора данных с установки. А для WhiteRabbit, это специализированная программа, которая собирает и записывает данные на сервере WR. Запуск и работа данных систем происходит независимо.

В настоящее время, все 7 кластеров оснащены системами синхронизации WR и SSBT. Получаемые данные используются при обработке событий.

Для обеспечения работ по развертыванию новых кластеров в 2021 и последующие годы в 2020 году были проведены следующие работы:

- комплектация, производство и испытания 864 оптических модулей;
- комплектация, сборка и испытания электронных модулей для трех кластеров;
- размещение заказов, производство и складирование всей номенклатуры кабельной продукции;
- ремонт и подготовка к экспедиции 2021 года автотранспортной техники и подъемных механизмов;
- строительство наземной трассы для подвода донных кабелей к Береговому центру управления телескопом;
- приобретение, установка на место и подключение к инженерным сетям 4 вагон-домов для размещения специалистов;
- проведены историко-археологические исследования и согласование рабочего проекта на реставрацию здания «Полуказарма»;

- проведены ремонт и оборудование помещений Байкальского технического стационара в г. Байкальске. В здании №1 оборудована мастерская по производству крупных металлических изделий для телескопа (рисунок 8). В помещениях гаража оборудована мастерская по ремонту автотранспортной техники (рисунок 9).



Рис. 8. *Мастерская по производству крупногабаритный металлических изделий*



Рис. 9. *Мастерская по ремонту автотранспортной техники*

1.3. Применение и значимость результатов исследования

Все описанные выше результаты работ используются в установленных в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2020 года двух новых кластеров и эксплуатируются в составе телескопа Baikal-GVD и будут использоваться в последующие годы в соответствии с планами по наращиванию эффективного объема телескопа.

На рисунке 10 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.

Эффективный объем детекторов для регистрации ливневых событий от нейтрино в области энергий 100 TeV – 10 PeV

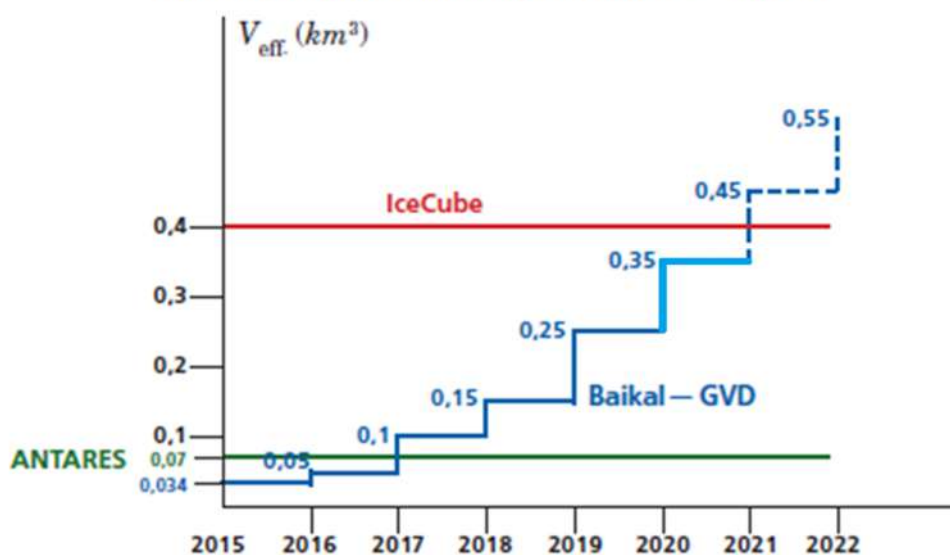


Рис. 10. Рост эффективного объема телескопа Baikal-GVD в результате установки новых кластеров.

При ожидаемом ходе развития Байкальского проекта в течение ближайших лет, на нейтринном телескопе ВАИКАЛ-GVD в конфигурации 2022 года можно будет ожидать регистрации не менее 6 - 8 нейтрино астрофизической природы в год с точностью определения направления прихода нейтрино при детектировании вторичных ливней в нейтринном телескопе Baikal-GVD составит 3-4 градуса в сравнении с 10-15 градусами в IceCube, и Байкальский телескоп станет одним из двух мощнейших в мире инструментов астрофизических потоков нейтрино высоких энергий. 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.

Эффективный объем действующего нейтринного телескопа в озере Байкал достиг 0,35 км³. 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 км³. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп является уникальной научной

установкой и, наряду с телескопами IceCube, ANTARES и KM3NeT входит в Глобальную нейтринную сеть (GNN) как важнейший элемент сети в Северном полушарии Земли.

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. Проводится регулярный обмен результатами и данными в рамках научного консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» и международной научной по программе «multi-messenger». 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.

Программы автоматической обработки входят в специально разработанный для Baikal-GVD пакет BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). Обработка организована в виде набора небольших программ для выполнения одной из комплекса задач, организованных в направленный ациклический граф. Управление графом осуществляется пакетом PyBARS, разработанным на основе пакета Luigi. Такая организация обработки данных позволяет, во-первых, легко добавлять или модифицировать отдельные этапы автоматического анализа; во-вторых, предоставляет возможность равномерно распределять нагрузку на вычислительные ресурсы. Основные этапы обработки представлены на рисунке 11.

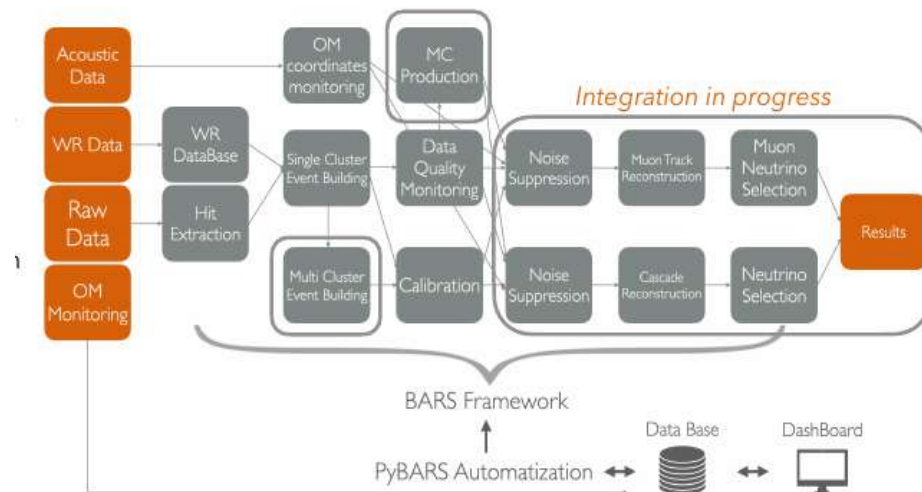


Рис. 11. Организация обработки данных телескопа

В настоящий момент граф обработки включает следующие этапы:

- a) Копирование данных из берегового центра на хранилище в Дубне. К ним относятся данные телескопа, системы позиционирования, мониторинга компонентов детектора и системы межкластерной синхронизации.
- b) Обработка сырых данных телескопа: выделение характеристик импульсов с дорожек ОМ, сшивка данных триггерной системы в события и т. д.
- c) Выделение триггерной информации.
- d) Определение координат ОМ на основе данных системы позиционирования.
- e) Калибровка измерительных каналов установки.
- f) Оценка качества данных и определение неполадок в работе детектора (DQM - data quality monitoring).

Сейчас выполняется интеграция программ подавления шумов, выделения и восстановления событий и онлайн моделирования в граф обработки.

Выходные данные хранятся в формате ROOT-файлов в хранилище данных в ОИЯИ, основанном на технологии EOS. Для задач Baikal-GVD ОИЯИ предоставил 600 ТБ EOS хранилища. Кроме того, для мониторинга, моделирования и задач высокоуровневого анализа используется СephFS хранилище ОИЯИ на 160 ТБ и 40ТБ на СХД в ИЯИ РАН.

К концу 2020 года суммарный объём сырых и обработанных данных составил 466 ТБ. Вычисления осуществляются на сервисе ОИЯИ JINR Cloud. Количество событий, полученных в результате регистрации на 5 кластерах телескопа Baikal-GVD за 2020 год и подготовленных для анализа и выделения событий, вызванных нейтрино высоких энергий, показано на рисунке 12. 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.

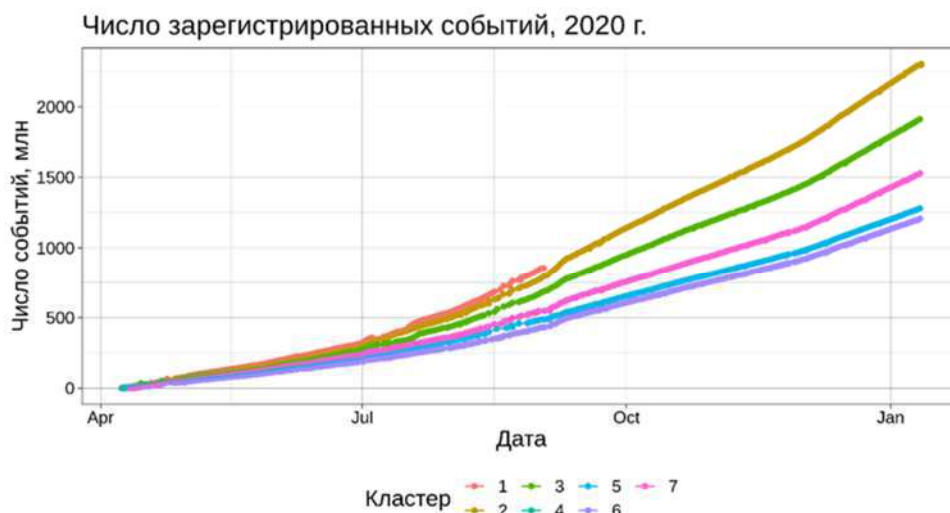


Рис. 12. Число зарегистрированных событий в 2020 году

В 2020 году были впервые осуществлены в течение 8 месяцев измерения оптических характеристик водной среды в месте установки телескопа. Ранее такие измерения проводились эпизодически, по результатам которых не удавалось отследить влияние внешних факторов на важнейшие характеристики среды: коэффициент поглощения и показатель рассеяния света в воде. На рисунках 13 и 14 показаны результаты измерений коэффициентов поглощения и рассеяния (обратные величины длинам поглощения и рассеяния) в различных длинах световых волн. Показатели поглощения и рассеяния достаточно стабильны в течение периода измерений даже при неблагоприятных условиях по помехам, которые наблюдались в этом году.

Измерения проводились в одной точке специально сконструированным специалистами НИИПФ ИГУ (Иркутск) и не имеющим аналогов в мировой практике прибором БАЙКАЛ5, прототипом которого служил ранее применявшийся прибор СП-15.

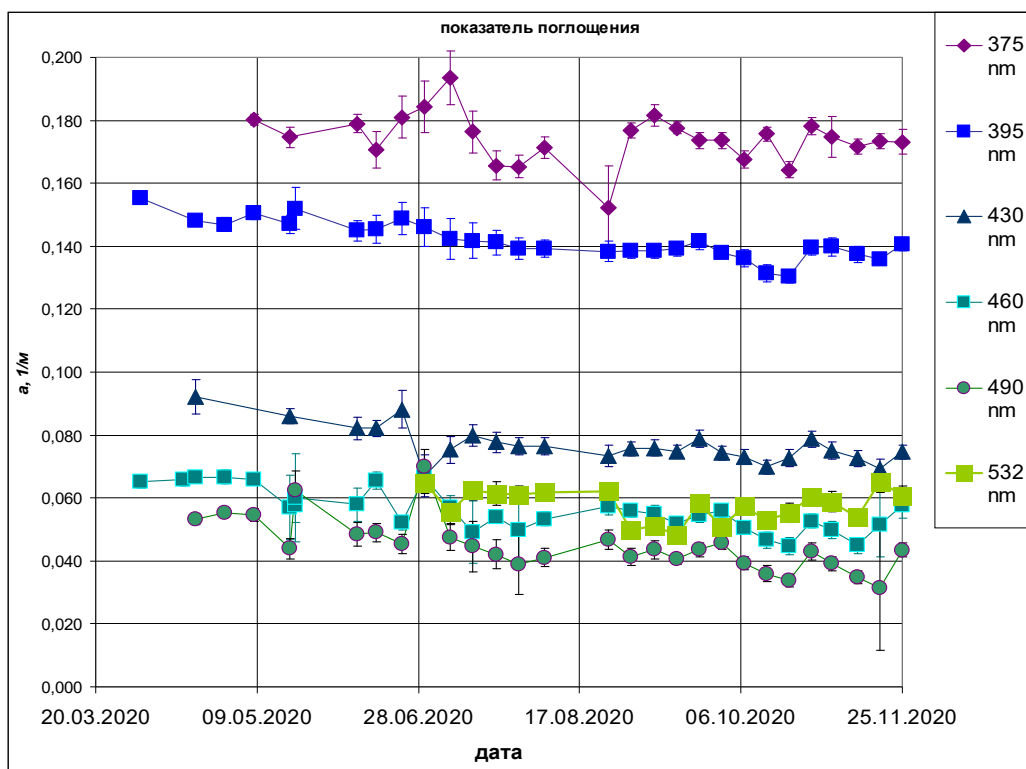


Рис. 13. Результаты измерений показателя поглощения за 8 месяцев 2020 года

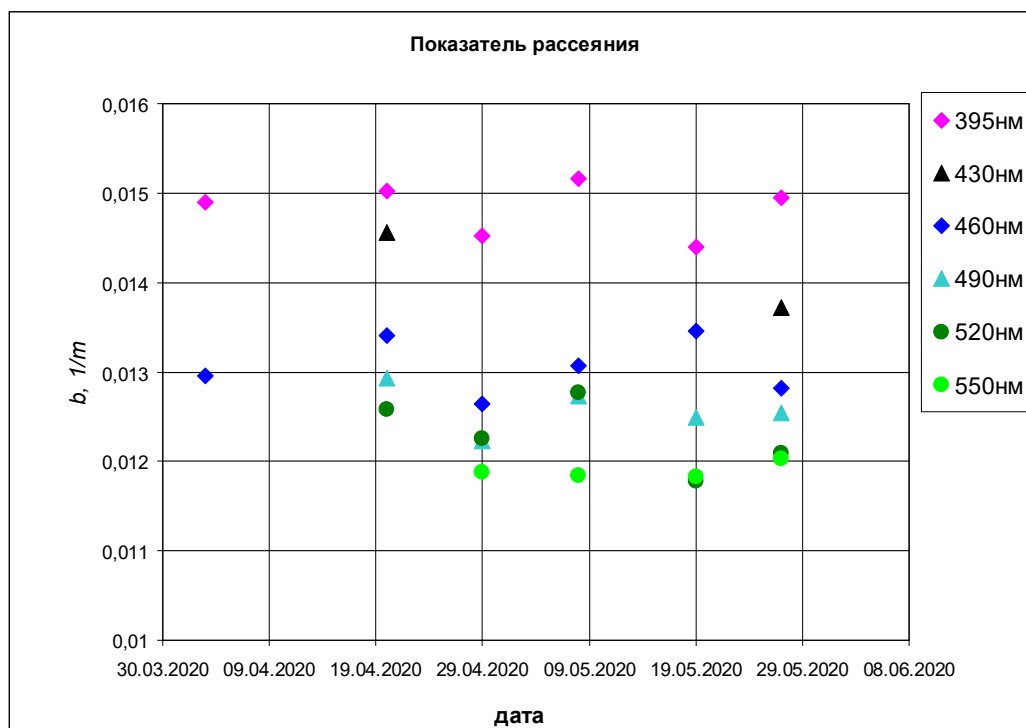


Рис. 14. Результаты измерений показателя рассеяния за 8 месяцев 2020 года

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 σ по сравнению с 13-14 σ 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, 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 получают 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 2020 году была проведена серия работ по моделированию регистрации частиц нейтринным телескопом Baikal-GVD методом Монте Карло (МК). С этой целью предварительно был проведен сбор и систематизация данных по работе установки. В частности, изучались данные систем мониторинга установки и

системы акустического позиционирования. На основе этих данных выделено несколько периодов стабильных условий работы установки в 2019 и 2020 сезонах. Используя эти данные, были подготовлены соответствующие конфигурационные файлы для программы моделирования установки, а также разработаны и налажены программные инструменты для визуализации конфигурационных данных и полуавтоматической генерации соответствующих конфигурационных файлов для произвольного периода работы установки (для каждого кластера отдельно). При этом для каждого оптического модуля индивидуально учитываются реально измеренная фоновая скорость счета, триггерные пороги и зарядовое распределение шумовых импульсов. Данные параметры усредняются по выбранному периоду времени длительностью около одного-двух месяцев. Начата разработка схемы моделирования, в которой для каждого измерительного сеанса (рана) будет генерироваться свой МК «сэмпл» - программный пакет с учетом данных, присущих только данному измерительному сеансу.

В результате исследований было проведено МК моделирование регистрации телескопом Baikal-GVD атмосферных мюонов и нейтрино с различными энергетическими спектрами. Основной упор был сделан на моделирование кластеров детектора с 1-го по 5-й, что соответствует конфигурации детектора в 2019 г. Начато моделирование по кластерам 6 и 7, построенным в 2020 г. Проведены работы по изучению видимых разногласий между реальными данными и результатами МК моделирования. По результатам этих исследований внесены коррективы в МК моделирование. В частности, скорректирована модель угловой диаграммы направленности чувствительности оптического модуля. Данная работа помогла добиться существенного прогресса в проведении экспериментальных измерений как атмосферных мюонов так и атмосферных нейтрино.

Для этих целей было использовано более 300000 часов процессорного времени в расчете на одно процессорное ядро на вычислительных средствах ИЯИ РАН и ОИЯИ.

Результаты моделирования в сравнении с реальными данными за 2019 год представлены на рисунке 15. Показано зенитное распределение восстановленных трековых событий до отбора событий по критериям качества. Реальные данные с Baikal-GVD 2019 года показаны черными точками (эквивалентное живое время в пересчете на один кластер = 323 дня). Результаты Монте Карло моделирования атмосферных

мюонов показаны красной гистограммой. $\cos(\theta)=1$ соответствует направлению вертикально вниз. Большинство событий, восстановленных с $\cos(\theta)<0$, представляют собой ошибочно реконструированные события от атмосферных мюонов и могут быть устранены при дальнейшем отборе событий по критериям качества фита. В основном результаты моделирования удовлетворяют требованиям для восстановления событий и физических исследований.

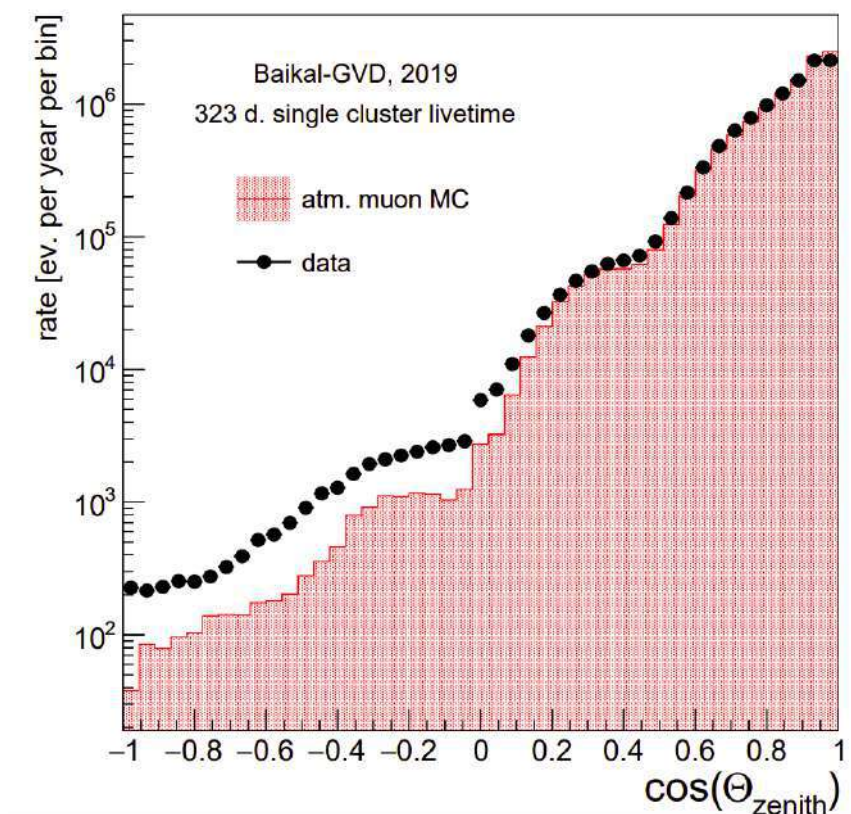


Рис. 15. Результаты моделирования в сравнении с реальными данными за 2019 год.

Для физического Физическое моделирование проводилось с использованием стенда, созданного в 2018 году. В 2020 году в работу стендов были введены изменения, в первую очередь в программы сбора данных с учетом изменений, внесенных в Основную программу управления телескопом и “online” сбора и обработки первичных данных. Также были внесены существенные изменения в направлении автоматизации сбора и анализа данных по результатам моделирования и испытаний систем сбора данных кластеров телескопа Baikal-GVD.

Физическое моделирование проводилось для кластеров с модифицированной системой сбора данных по результатам разработок 2019-2020 годов.

На стенде (рисунок 16) 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. Выявленные ошибки и неисправности в процессе испытаний устраняются до полного отсутствия и бесшумной работы электронных систем.

Два установленных в состав телескопа кластера Baikal-GVD в 2020 году прошли предварительные исследования и долговременные испытания на стенде.



Рис. 16. Стенд для испытания кластеров телескопа.

3.3. Применение и значимость результатов исследования

Результаты исследований были использованы при создании и эксплуатации нейтринного телескопа Baikal-GVD в 2020 году, что позволило существенно улучшить качество накапливаемых данных, повысить надежность телескопа и выделять при последующем анализе и обработке события, вызванные астрофизическими нейтрино высоких энергий, что, безусловно, относится к результатам мирового уровня.

Исследования по моделированию работы телескопа как необходимый элемент в

обеспечении надежности 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, развитие среды BARS для решения задач нейтринной астрономии и астрофизики высоких энергий.

4.2. Результаты исследований

В результате исследований завершен первый этап разработки: подготовлены экспериментальные данные для выделения и восстановления событий в автоматическом режиме за 2019-2020 годы. Получены первые физические результаты и показано их согласие с результатами моделирования.

В Байкальском эксперименте обработка и анализ данных осуществляется в единой программной среде BARS - Baikal Analysis and Reconstruction Software. В 2020 году введена в эксплуатацию новая версия BARS v1.3 со следующими усовершенствованными приложениями (блоками):

- блок автоматической обработки данных акустической системы позиционирования с точностью измерения положения оптических модулей порядка 20 см;
- блок автоматической обработки данных, позволяющий получать готовые однокластерные события с задержкой менее чем 24 часа относительно момента возникновения реального физического события;
- блок, реализующий методику восстановления мюонных треков в телескопе с угловым разрешением порядка 1 градуса;
- блок, реализующий методику подавления шумовых сигналов (преимущественно от свечения озера), позволяющую исключить в среднем 96% шума и оставить в среднем 94% сигнала для событий от мюонных нейтрино;
- блок, реализующий методику выделения мультикластерных событий, которые регистрируются на двух и более кластерах телескопа;
- 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);

- 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;

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

- методика мониторинга качества данных, проверяющая поток событий на соответствие распределению Пуассона. Эта методика позволяет определить аппаратные и программные неисправности; в частности, несанкционированные запуски калибровочных источников света.

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

- обновленная архитектура обработки и хранения данных телескопа с учётом введения версионности обработки и калибровок детектора. Выполнена подготовка к автоматическому потоковому моделированию событий на основе полученных данных.

На рисунке 17 представлен результат работы блока по подавлению шумов на реальном событии в кластере телескопа.

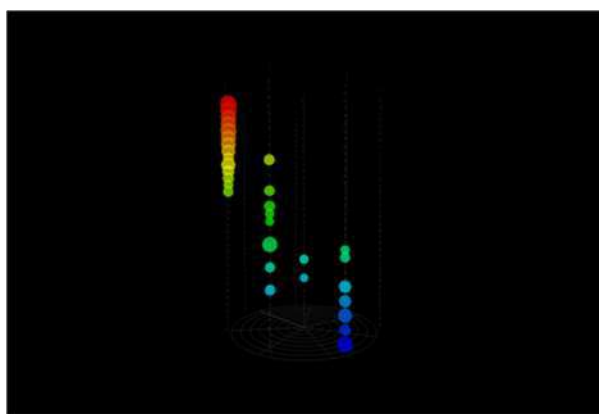
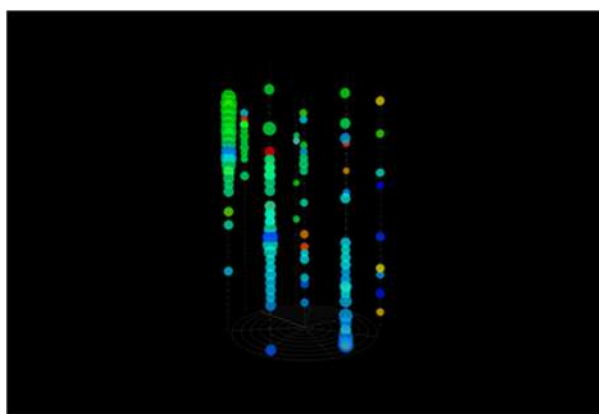


Рис. 17. *Результаты применения новой методики подавления шума на примере нисходящего события. А – картина отклика оптических модулей одного кластера телескопа до подавления шумов; Б – тоже после подавления шумов.*

На основе этих нововведений были получены первые физические результаты Baikal-GVD. На основе выборки данных, полученных с апреля по июнь 2019 года (323 дня суммарной однокластерной экспозиции) было выделено 57 восходящих событий, предположительно от атмосферных мюонных нейтрино. Моделирование показывает, что ожидаемый фон от атмосферных мюонов для текущей версии выделения и восстановления событий за этот период составляет < 1 события.

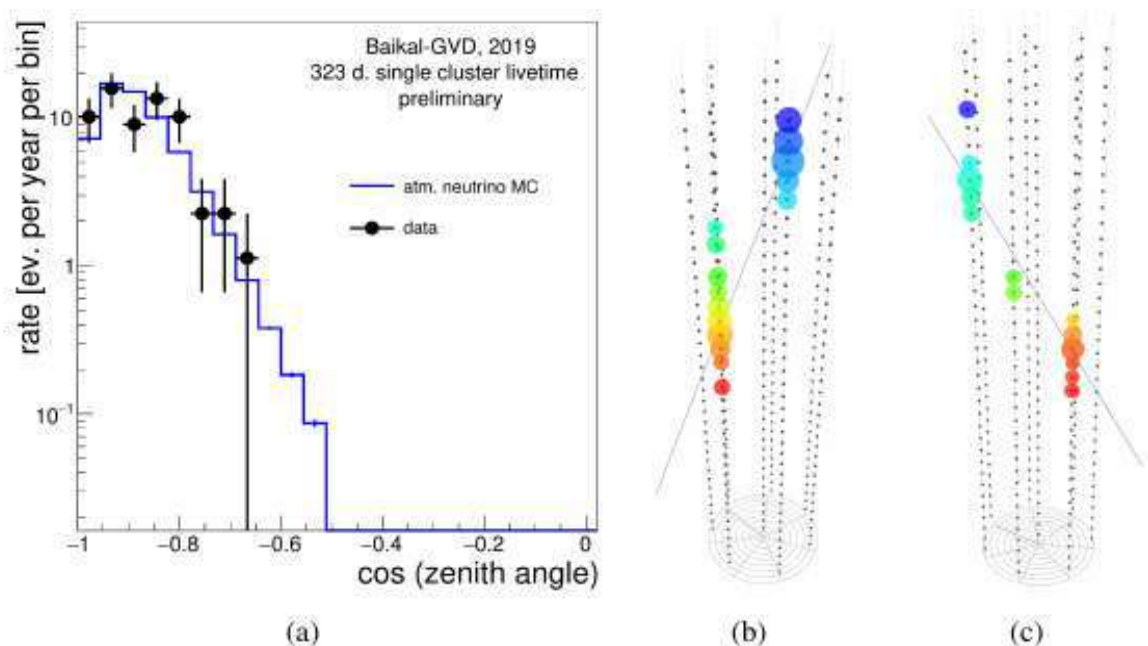


Рис. 18. *(a) Зенитное распределение зарегистрированных событий относительно результатов моделирования, (b) восходящее событие, зарегистрированное 11 июня 2019 года, кластер 1, зенитный угол 162 градуса, (c) восходящее событие, зарегистрированное 18 июня 2019 года, кластер 5, зенитный угол 148 градусомимо событий от мюонных нейтрино, на основе данных с 2016 по 2019 гг. восстановлены 12 нисходящих каскадов с энергией выше 100 ТэВ и 1 восходящий каскад с энергией порядка 91 ТэВ.*

Зенитное распределение восстановленных событий от атмосферных мюонов за 2016 год также совпадает с результатами моделирования (рисунок 19).

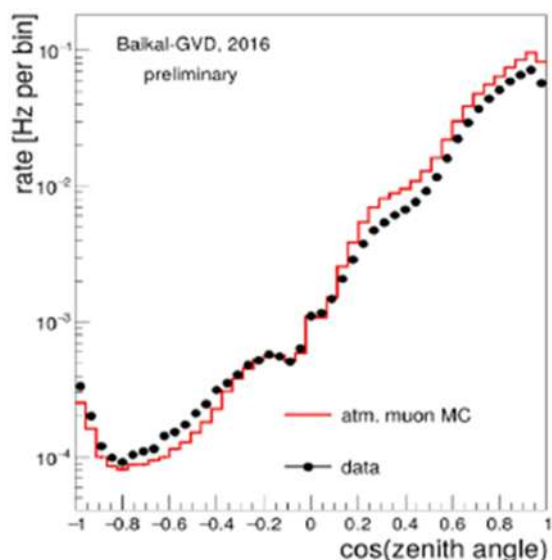


Рис. 19. *Зенитное распределение темпов счёта атмосферных мюонов.*

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 (1013–1018) 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 2020 году телескоп Baikal-GVD достиг соизмеримого с IceCube эффективного объема в 0,35 км³ 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 2020 году завершен анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа Baikal-GVD, накопленных в 2016, 2018 и в 2019 годах. Общий объем данных, включенных в анализ, соответствует 2294 дням (6,28 года) эффективного набора данных одним кластером нейтринного телескопа Baikal-GVD. В результате обработки и анализа данных был сформирован банк экспериментальных данных, содержащий 6270 события, который удовлетворяет критериям отбора каскадов с энергией выше 10 ТэВ и множественностью числа сработавших оптических детекторов телескопа - более девяти.

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 и фоновых событий от атмосферных мюонов и нейтрино были выработаны более строгие критерии отбора каскадных событий от астрофизических нейтрино, в том числе множественность числа сработавших оптических детекторов телескопа должна быть больше или равна двадцати, 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. Этим критериям отбора удовлетворяют 12 событий. В результате применения дополнительных критериев отбора к набору экспериментальных данных было установлено, что 6 событий являются фоновыми событиями от атмосферных мюонов. Таким образом, в этом наборе экспериментальных данных выделено шесть событий – первых кандидатов на роль нейтрино астрофизической природы, зарегистрированных в экспериментах на нейтринных телескопах, расположенных в Северном полушарии. На рисунке 20 слева приводится энергетическое распределение событий с множественностью $N_{hit} > 19$ OM. Красным цветом выделены события – кандидаты на астрофизические нейтрино, а синим цветом – события из-под горизонта, которые имеют высокую вероятность принадлежности к событиям астрофизической природы. На рисунке 20 справа приводится распределение этих же событий по косинусу зенитного угла.

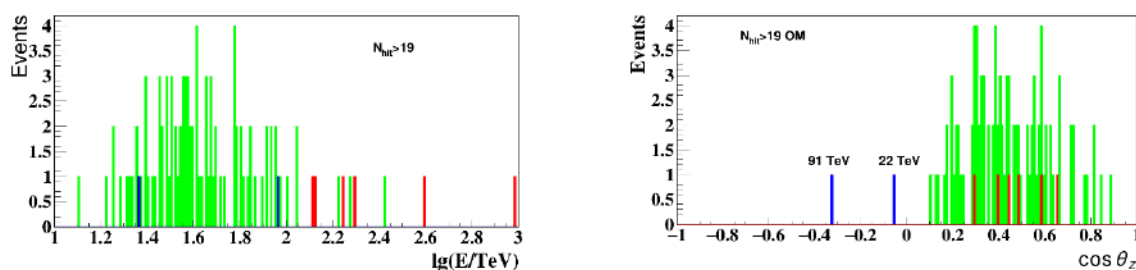


Рис. 20. *Расположение на небесной сфере источников излучения кандидатов на роль астрофизических нейтрино*

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 2016-2020 годов детектирующий объем телескопа достиг значения в 0,35 км³, что позволило вести исследования в рамках программ «multi-messenger» - исследований астрофизических объектов и процессов, протекающих в них.

5.3. Применение и значимость результатов исследования

В целом 2020 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 2020 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. 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 2020 г. были продолжены накопление и анализ данных в рамках поиска проявлений темной материи в потоках нейтрино высоких энергий, регистрируемых кластерами телескопа Baikal-GVD. Вероятными источниками потока нейтрино от аннигиляции или распада частиц темной материи типа WIMP рассматриваются центр Галактики, темные сфероидальные карликовые галактики, Солнце или ядро Земли [1, 2, 3, 4]. Представленная методика поиска сигнала по данным ранее действующего байкальского нейтринного телескопа НТ-200 и полученные ограничения на параметры моделей темной материи взяты за основу анализа данных кластеров телескопа Baikal-GVD. Улучшить методику поиска сигнала от WIMP позволяет измерение энергии ливня при восстановлении физического события на отдельном кластере и наращивание эффективного объема установки в целом. В 2020 г. для энергий выше 100 ТэВ эффективный объем регистрации увеличился до 0.35 км³ в комплексе семи кластеров.

В течение 2020 г. решалась задача определения числа фоновых событий в энергетических бинах от 10 ТэВ до 10 ПэВ в зависимости от склонения источника на небесной сфере по сформированной базе данных выделенных ливней (см. Раздел 5).

Получено, что для источников Северного полушария уровень фона от атмосферных мюонов превышает ожидаемый нейтринный сигнал. В настоящее время ведется работа по оптимизации сигнал-шум путем симуляции процессов компьютерными средствами. Для источников Южного неба требуется накопление большей статистики данных, и так же более подробная симуляция отклика кластера GVD.

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 потребуется 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 слабовзаимодействующих частиц темной материи с каждым годом возрастают. Исследования по моделированию работы телескопа будут продолжены на весь срок создания и эксплуатации нейтринного телескопа.

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 слабовзаимодействующих частиц темной материи с каждым годом возрастают.

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

7. Второй и третий этапы 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. 21), искусственным источником нейтрино ^{51}Cr . После каждой экспозиции атомы ^{71}Ge , образованные в реакции захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga , в течение суток извлекались из каждой зоны мишени и помещались в специальные

низкофоновые счетчики, устанавливаемые на счет в специально изготовленные счетные системы. В марте 2020 года завершены счетные измерения всех извлечений. Выполнен сбор и обработка данных двумя независимыми группами обработчиков данных.

Для оценки вкладов систематических неопределенностей в результаты измерений проведены работы по уточнению геометрических конфигураций галлиевых мишеней, рисунок 21.

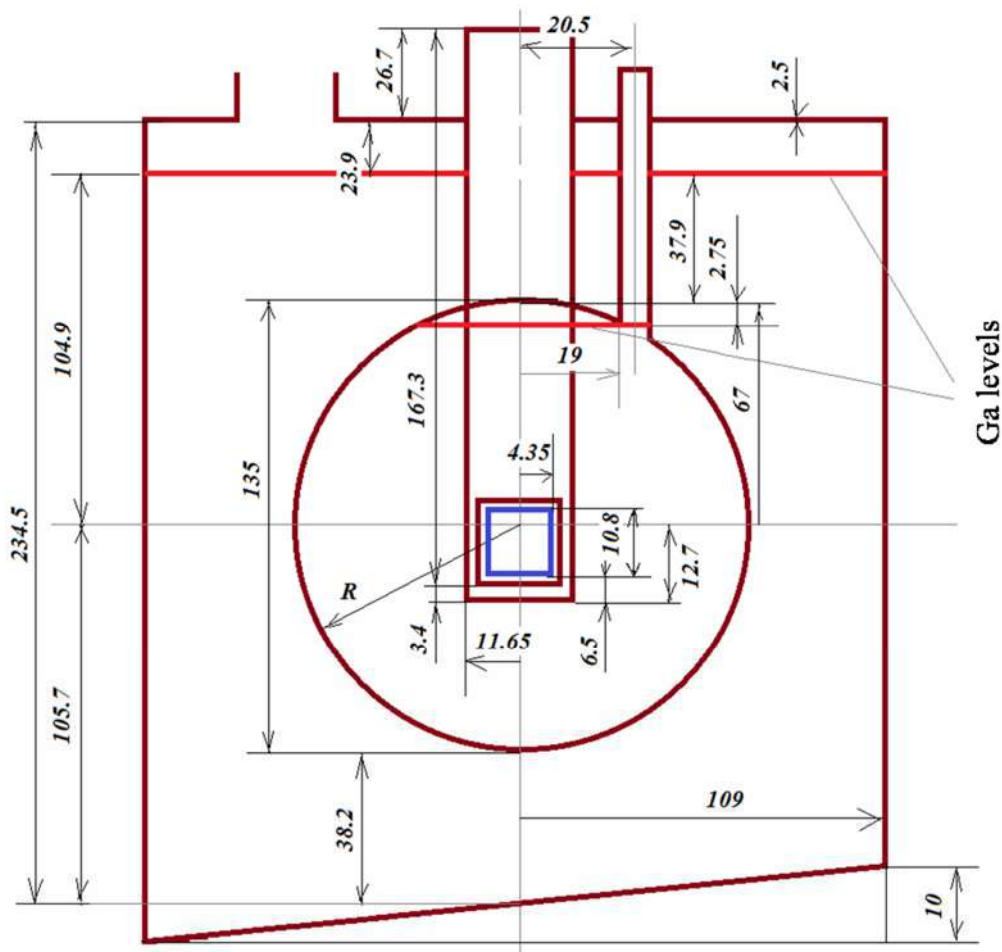


Рис. 21. Размеры галлиевых мишеней в двухзонной установке.

Для данной геометрии объем цилиндрической емкости $V_{ц} = 6.5561 \text{ м}^3$, масса галлиевой мишени - 39.9593 т, объем сферической емкости - $V_{сф} = 1.22545 \text{ м}^3$, масса - 7.4691 т.

С учетом геометрических размеров мишеней были пересчитаны длины пробегов в сферической и цилиндрической мишенях, а также соответствующие им ожидаемые скорости образования в начале облучения источником ^{51}Cr активностью 3.409 МКи [6]:
 $\langle L_{сф} \rangle = 52.0 \pm 0.04 \text{ см}$, ожидаемая скорость образования $R_1 = 69.3 \pm 0.05 \text{ ат/д}$
 $\langle L_{ц} \rangle = 54.4 \pm 0.01 \text{ см}$, ожидаемая скорость образования $R_2 = 72.5 \pm 0.01 \text{ ат/д}$.

7.1. Измерения с изотопом ^{37}Ar объёмных эффективностей пропорциональных счётчиков, использовавшихся в измерениях BEST.

В эксперименте BEST применялись новые счетчики, характеристики которых должны были быть измерены после окончания измерений в эксперименте. Для измерения объёмных эффективностей применялся изотоп ^{37}Ar .

Измерения проводились на спектрометрической системе, состоящей из стандартного для данной задачи набора оборудования: малошумящего зарядочувствительного усилителя в экранирующем медном корпусе (постоянная времени цепи обратной связи около 100 мкс), спектрометрического усилителя ORTEC-572 (усиление 200, постоянная времени формирования импульсов 1 мкс, ручная настройка p/z) и многоканального анализатора импульсов Аспект БПА-02 (шкала 2048 каналов). Состав газовой смеси для заполнения счетчиков: $\text{Ar}(54.9\%)+\text{Xe}(41.0\%)+\text{GeH}_4(4.1\%)$. Активность ^{37}Ar составляла $\sim 550 \text{ с}^{-1}$. Объёмная эффективность определялась как отношение измеренной скорости счёта в счётчике к известной активности ^{37}Ar в газе счётчика. Таким образом были измерены объёмные эффективности всех счётчиков. В таблице 1 приведены посчитанные значения объёмных эффективностей.

Таблица 1. Посчитанные объёмные эффективности (в скобках приведены ранее посчитанные эффективности)

		ε_v
1	YCN-42	0.927
2	YCT-4	0.956
3	YCN-41	0.895
4	YCN-46	1.004
5	YCT-8	0.940 (0.922)
6	YCT-9	0.939 (0.954)
7	YCT-97	0.942
8	YCT-92	0.954
9	YCT-3	0.948 (0.954)
10	YCT-2	0.960 (0.958)
11	YCN-113	0.949
12	YCN-43	0.964
13	YCN-A9	0.964

Среднее по всем счётчикам значение объёмной эффективности составляет $\varepsilon_v = 0.949$.

Средняя объёмная эффективность для новых счетчиков типа YCN: 0.940 ± 0.026 .

Средняя объёмная эффективность для старых счетчиков типа YCT: 0.948 ± 0.008 .

Средняя разница между старыми (приведены в скобках) и новыми значениями ϵ_V для четырёх счётчиков УСТ равна $1.0 \pm 0.6\%$, т.е. полученные в данных измерениях объёмные эффективности данных счетчиков хорошо согласуются с предыдущими измерениями. Ошибка измерений объёмной эффективности отдельного счётчика составляет: $+1.0/-0.7\%$.

7.2. Измерения эффективностей счётчиков в пиках распадов ^{71}Ge и времен нарастания фронта импульсов от распадов ^{71}Ge .

Эффективности в пиках определяем как отношения $\epsilon_{L,K} = \frac{s_{L,K}}{\Sigma}$, где $s_{L,K}$ – число событий в L или K пике в спектре распадов ^{71}Ge , а Σ – суммарное число событий распадов ^{71}Ge во всём диапазоне энергий. Считаем, что $\Sigma = s_M + s_{ML} + s_L + s_{LK} + s_K + s_{K+}$, т.е. суммарное число событий складывается из числа событий в M, L и K пиках s_M , s_L и s_K , – числа событий между пиками s_{ML} и s_{LK} и числа событий с энергией выше K пика s_{K+} . Энергия в M, L и K пиках: 0.2, 1.2 и 10.4 кэВ. Для измерений пиковых эффективностей важно, чтобы не было значительного фонового счёта, например, от распадов ^{68}Ge , в которых рождается большое количество позитронов, создающих непрерывную фоновую подложку в спектре импульсов в пропорциональных счётчиках.

Образец стабильного германия массой 48 мг, обогащённый по изотопу ^{70}Ge до 97,62%, был облучён в ядерном реакторе ИРМ в течение 93 сек в потоке тепловых нейтронов около $1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Энергии нейтронов в реакторе меньше 8-10 МэВ исключали наработку в мишени других изотопов германия, кроме ^{71}Ge . Активность образца к 13 ноября 2020 составляла порядка $8 \cdot 10^4$ Бк.

Измерения проводились с 17 по 20 ноя 2020 на системе счёта Аспект. Моногерманий для газовой смеси, которой заполнялись счётчики, был приготовлен из германия из облучённого образца, примерно из 1 / 200 –й его части. Активность ^{71}Ge в газовой смеси в начале измерений $\sim 200 \text{ с}^{-1}$. Все счётчики измерялись с использованием одной и той же газовой смеси, которая перемещалась из счётчика в счётчик после окончания очередных измерений. На рисунке 22 представлен спектр, на котором видны L и K пики распада ^{71}Ge .

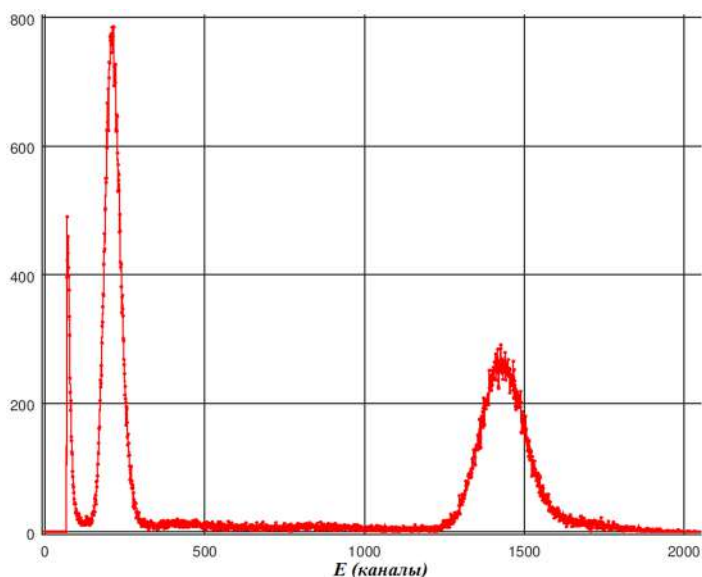


Рис. 22. Спектр распадов ^{71}Ge с L и K пиками.

Времена нарастания фронта импульсов от распадов ^{71}Ge (T_n) определялись из аппроксимации формы импульсов событий в пиках. В таблице 2 представлены результаты измерений пиковых эффективностей и времен нарастания для каждого счетчика.

Таблица 2. Пиковые эффективности и времена нарастания.

Счетчик	K-пик		L-пик		T _n , нс	
	ϵ_K	Σ	ϵ_L	Σ	K-пик	L-пик
YCN113	0.3653	0.005	0.38	0.0075	13.6	9.1
YCN41	0.3814	0.003	0.393	0.0055	13.4	10.3
YCN43	0.3856	0.003	0.38	0.004	13.2	10.0
YCN46	0.385	0.003	0.389	0.0039	15.2	11.3
YCN49	0.3133	0.004	0.355	0.0096	18.8	13.2
YCT2	0.3885	0.003	0.401	0.0036	16.6	10.1
YCT3	0.3987	0.003	0.399	0.0054	16.4	10.3
YCT4	0.3861	0.006	0.376	0.0051	13.2	10.2
YCT9	0.3908	0.003	0.402	0.0045	14.9	9.1
YCT92	0.3934	0.002	0.4	0.0033	17.6	13.0
YCT97	0.3903	0.003	0.399	0.0038	17.3	11.4

С использованием новых параметров счетчиков была проведена обработка и анализ данных эксперимента BEST. В настоящее время проводится сравнительный анализ отобранных в измерениях событий независимыми группами обработчиков. Первые результаты эксперимента планируются получить в марте 2021 г.

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 оптимальной формы ёмкости ББНТ рассматривались три варианта формы: сфера, «пилюля» (цилиндр и две полусферы) и цилиндр. От цилиндрического варианта было решено отказаться из-за высокой неоднородности светосбора.

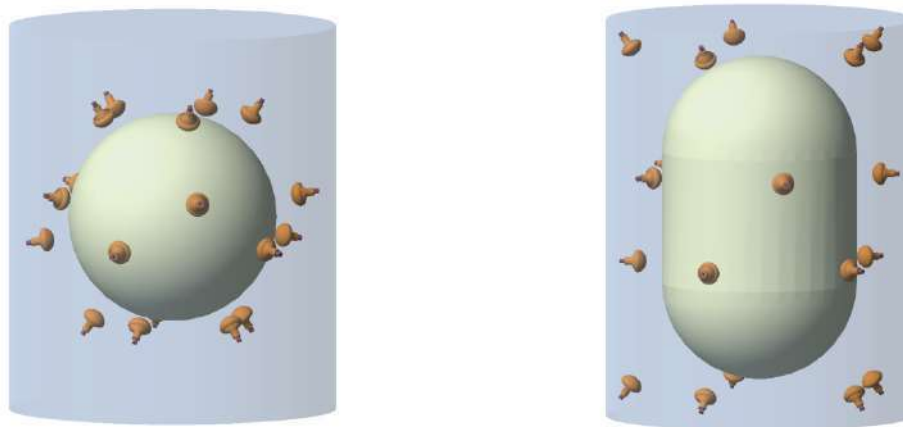


Рис. 23. Сферическая емкость для сцинтиллятора (слева) и "пилюля" (справа), окруженные 20-ю ФЭУ.

Предварительные оценки разрешения для оставшихся двух опций (Рис. 23) были проведены с использованием специально разработанного Монте-Карло пакета на основе Geant4 (LSMC). Отбирались только события из доверительного объема внутри сцинтиллятора, из которого был исключен внешний слой толщиной 50 см. Расчеты показали, что для 5-тонной сферы, окруженной 20-ю ФЭУ можно получить разрешение порядка 9%, в то время как для "пилюли" массой 10 тонн оно было оценено в 10.5%. Для 48 ФЭУ разрешение для сферы и "пилюли" 5.3% и 6.6% соответственно. Соответствующие распределения светосбора для 1 МэВ электронов, равномерно распределенных внутри доверительного объема показаны на Рис.24.

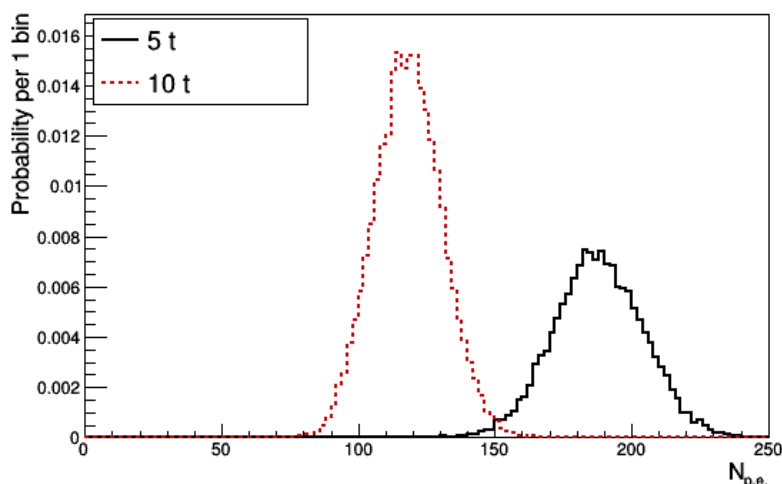


Рис. 24. *Распределения светосбора 20-ю ФЭУ для 5-тонной сферы и 10-тонной "пилюли".*

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.

Артемовский Сцинтилляционный Детектор (АСД) расположен в соляной шахте на глубине 570 м.в.э. Основной задачей эксперимента является поиск нейтринного излучения от коллапсирующих в нашей Галактике звезд [7]. Масса мишени для поиска нейтринного излучения от коллапсов звезд равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам окружающей детектор соли (NaCl).

Фон естественной радиоактивности соли примерно в 300 раз меньше, чем в обычном грунте. Глубина расположения установки также позволяет набирать статистику взаимодействия нейтронов за относительно короткие сроки, и достаточно велика для экстраполяции полученных данных на другие глубины. Эффективность регистрации замедлившихся до тепловых энергий нейтронов составляет для АСД около 80 %, если источники нейтронов равномерно распределены по объему сцинтиллятора. Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр (556 ± 3) см, высота 547 см; содержит 105 тонн жидкостного сцинтиллятора на основе уайт-спирита C_nH_{2n} , $n = 10$. По поверхности цилиндра равномерно расположены 128 ФЭУ-49Б, 16 ФЭУ-110 и 16 ФЭУ-30.

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

а) в энергетическом диапазоне от 5 МэВ до 50 МэВ за 20 сек. регистрируются кластеры импульсов (триггеры), которые при вспышке являются результатом детектирования позитронов в реакции ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, E_e = E_\nu - 1.3 \text{ МэВ}$);

б) триггер открывает временные ворота длительностью $\Delta t = 1 \text{ мсек}$ с энергетическим порогом 1 МэВ, т.е. в энергетическом интервале от 1 МэВ до 5 МэВ регистрируются γ -кванты от реакции захвата нейтрона в реакции ($n + p \rightarrow d + \gamma, E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}$).

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

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

За период наблюдения за Галактикой по данным установки с 1977 г. по октябрь 2020 г. кандидатов на вспышки Сверхновых обнаружено не было. Экспериментально получено, что фоновые события распределены по закону Пуассона. Предел на частоту коллапсов на 90% уровне достоверности определяется по формуле: $1/f_{\text{col}} = \Delta T / \ln(0.1)$, где ΔT – время наблюдения.

Таким образом, за $\Delta T = 42.75 \text{ г}$ работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 18.56 года на 90% доверительном уровне ($f_{\text{col}} < 0.054 \text{ 1/год}$).

С 1 октября 2020 года детектор АСД был выключен в связи с эпидемической ситуацией в г. Бахмуте на Украине. Дежурства на установке прекратились, сотрудники занимались обработкой данных эксперимента на серверах удаленно.

Основная цель LVD – поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд [8]. По этой программе LVD работает с 1992 года. Детектор LVD (Large Volume Detector), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине $\langle H \rangle = 3650 \text{ м.в.э.}$, состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами $100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. 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. В детекторе имеется два энергетических порога: верхний $E_{\text{NET}} = 4 \text{ МэВ}$, и нижний $E_{\text{LET}} = 0.5 \text{ МэВ}$.

Установка LVD способна регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом (Табл. 3).

Таблица 3. Реакции взаимодействия нейтрино в веществе LVD

	Каналы взаимодействия нейтрино	Энергетический Порог	%
1	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	1.8 МэВ	88
2	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	17.3 МэВ	1.5
3	$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	14.4 МэВ	1.0
4	$\nu_i + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_i + {}^{12}\text{C}^* + \gamma$	15.1 МэВ	2.0
5	$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^-$		3.0
6	$\nu_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* + e^-$	10.0 МэВ	3.0
7	$\bar{\nu}_e + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{56}\text{Mn} + e^+$	12.5 МэВ	0.5
8	$\nu_i + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow \nu_i + {}^{56}\text{Fe}^* + \gamma$	15.0 МэВ	2.0

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

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме *on-line* осуществляется во временном окне $\Delta t < 20$ с и 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 *on-line* посылаются в систему SNEWS. LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме *on-line* с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось.

Поиск кластеров $\bar{\nu}_e$ -событий *off-line* осуществляется в течение временного окна с длительностью Δt до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется Δt и количеством событий внутри Δt . Для каждого кластера, была определена частота имитации F_{im} . За период с 1992 по 2020 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее $1/100$ г⁻¹. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения.

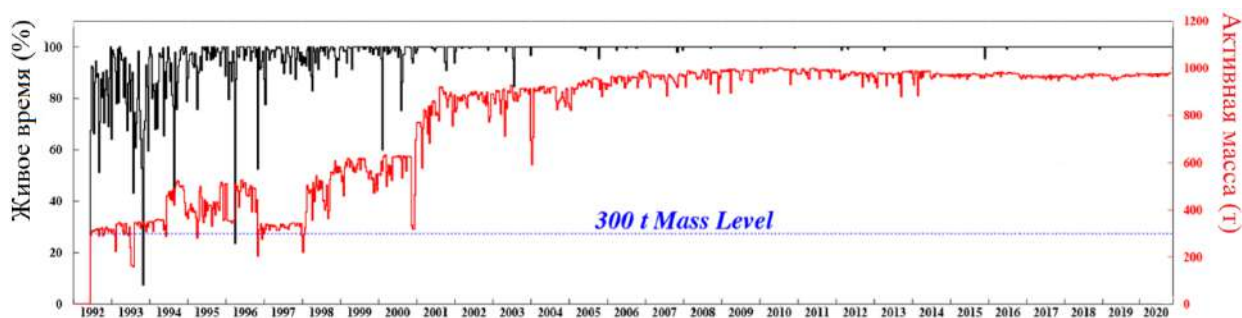


Рис. 25. Рабочий цикл LVD (черная кривая) и активная масса (красная кривая) как функция времени с 1992 по 2020 гг.

Несмотря на пандемию, связанной с коронавирусом COVID-19, научная программа работ на LVD в 2020 году выполнена полностью. Детектор работал в штатном режиме (Рис. 25). Дежурства велись удаленно, живое время работы составило 99.9%.

По данным работы нейтринного телескопа LVD за 28 лет работы (1992 - 2020), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 12.2 г. на 90% уровне достоверности.

9.2. Анализ данных детектора БПСТ

По информации БПСТ за 2020 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации составило 332.5 суток – 90.8 % от календарного времени за период с 01 января 2020 по 31 декабря 2020 года. Чистое время набора по данной задаче (с учетом мертвого времени телескопа) составило 326.7 суток.

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 ≈ 15 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 2020 году информации, обработано 474286628 события. Из этих событий отобраны одиночные события для двух детекторов Д1 и Д2 – 594297 событий для Д1, 3316458 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 2020 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 2020 года не было обнаружено.

На рис. 26 показано распределение фоновых событий по множественности m в скользящем временном окне, равном 20 секундам, за период 2001-2020 годы.

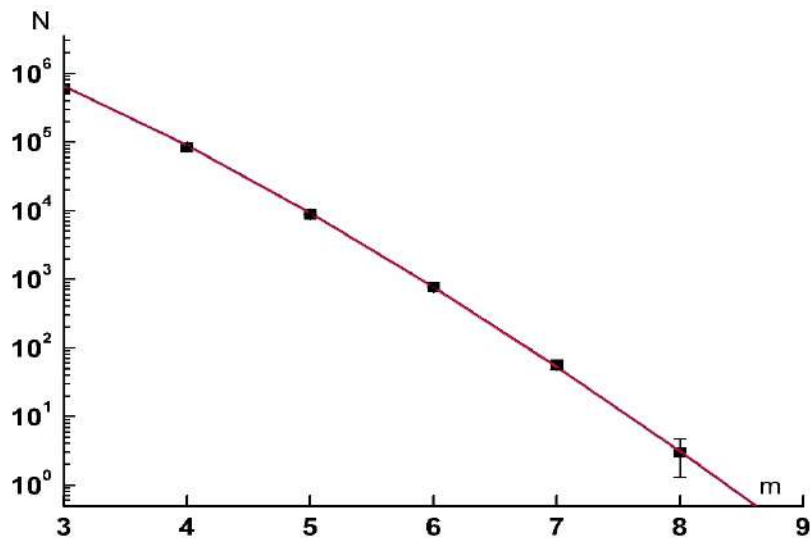


Рис. 26. *Распределение кластеров по множественности m за 2001- 2020 год, в скользящем интервале $dt=20$ сек. Точки – эксперимент, линия – расчет.*

Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2020 года составляет 34.9 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90%

доверительном уровне по данным БПСТ составляет 0.066 год^{-1} .

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

В 2020 году продолжала работать система оперативного оповещения членов коллаборации БПСТ о нейтринной вспышке. Вся информация полученная с БПСТ поступает в оперативную память on-line компьютера. Каждые 15 минут (в 0, 15, 30 и 45 минут каждого часа) эта информация записывается в файл, номер которого однозначно связан с календарным временем. Через 20 сек этот файл отправляется на сервер БНО и через 4 минуты начинается обработка информации, в том числе, по программе поиска нейтринных всплесков. Этот процесс занимает около 1 минуты. Если обнаружено событие с множественностью ≥ 6 как детекторе Д1, так и в детекторе Д2, то генерируется рассылка информации об этом событии сотрудникам БПСТ, на мобильные телефоны (СМС) и электронную почту. Рассылка алерта внутри коллаборации проходит без сбоев. Проводится работа по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS, которая в 2020 году переходила на новый формат (SNEWS2.0). В настоящее время ведется тестирование соединения со SNEWS2.0.

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. Было отремонтировано и настроено 85 логарифмических LC–преобразователей центральной части установки и 3 RC–преобразователя мюонного детектора. Были отремонтировано 12 детекторов (8 жидкостных и 4 пластических), причиной которых явилось выхода из строя делителей и ФЭУ-49 (заменены 7 ФЭУ).

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 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. В 2020 году (с 1 по 360 день) чистое время набора по данному триггеру составило 248 дней, было зарегистрировано 20746 ливневых событий с пороговой энергией 300 ТэВ. Распределение этих событий по числу мюонов в МД в зависимости от мощности ливня приведено на рис. 27.

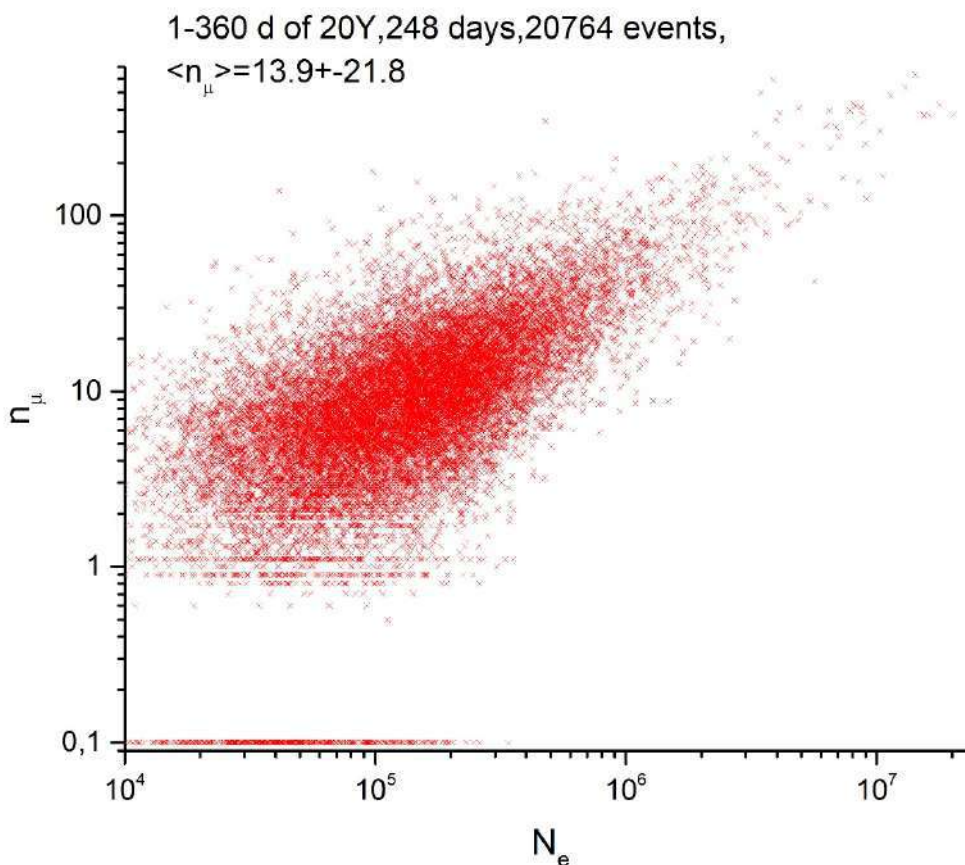


Рис. 27. *Распределение зарегистрированных ливневых событий по числу мюонов в МД в зависимости от мощности ливня.*

В 2020 году продолжались работы по созданию установки «Ковер-3», частично завершены пуско-наладочные работы на мюонном детекторе (МД). По коэффициентам усиления ФЭУ (с точностью 10%) и по порогам КФ (с точностью 20 %) настроены 235 сцинтилляционных счетчиков МД. Включен набор информации с КФ 235 сцинтилляционных пластиковых счетчиков МД по триггеру с наземной установки «Ковер». Проведено расширение наземной части установки, сверху на здании МД и по территории установки смонтированы еще 29 модулей (фургонов), изготовленных из теплоизоляционных блоков, т.о. общее их количество равно 39 (рис. 28). В семи из них

установлены по девять сцинтилляционных счетчиков на основе пластического сцинтиллятора 1 м² каждый. Собраны и настроены еще 18 таких счетчиков, которые будут установлены в 2-х наземных модулях.

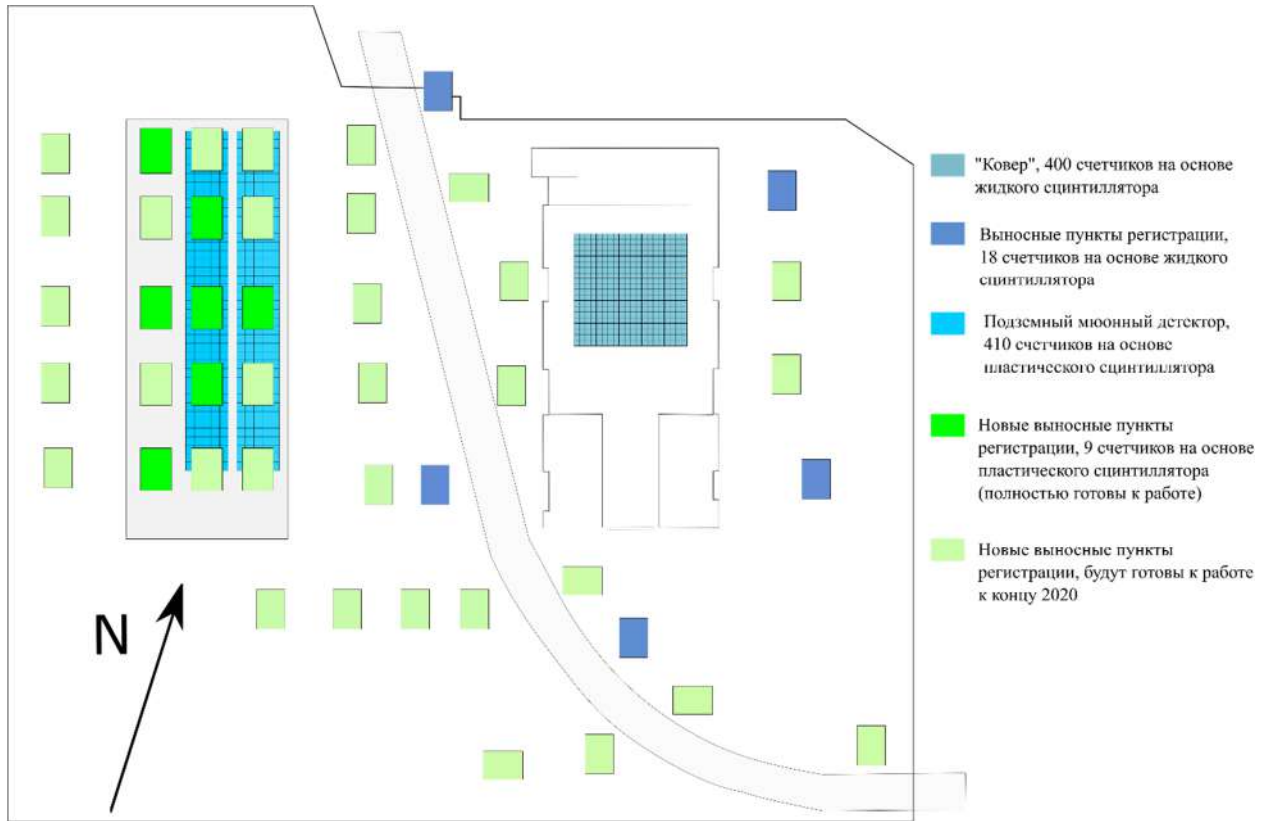


Рис. 28. Текущая конфигурация установки “Ковер-3”.

11.2. Участие в работе международной коллаборации TAIGA

Экспериментальный комплекс TAIGA состоит из широкоугольных черенковских детекторов ШАЛ Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE, сети узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT и сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE. Черенковский детектор Tunka-133 был создана для исследования космических лучей в области энергий 10^{15} - 10^{18} эВ. Установка TAIGA-HiSCORE имеет порог по энергии 40 ТэВ для гамма-квантов и 80 ТэВ для протонов. Создаваемая сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов TAIGA-IACT будет состоять из 10-12 телескопов. В настоящее время действуют два таких телескопа. Телескопы нацелены на регистрацию гамма-квантов от локальных источников. Энергетический порог телескопов ~ 2 ТэВ.

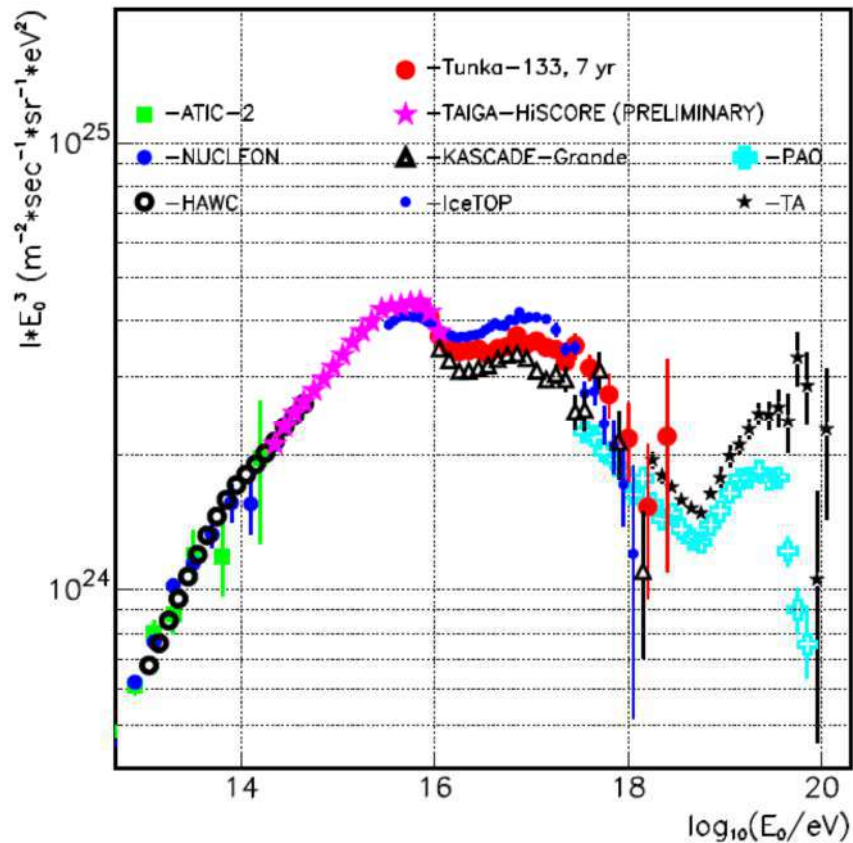


Рис. 29. Энергетические спектры первичного космического излучения, измеренные установками Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE.

На рис. 29 представлен энергетические спектры первичного космического излучения в диапазоне энергий $2 \times 10^{14} \div 2 \times 10^{18}$ эВ. Как видно из рисунка, энергетические спектры космических лучей, измеренные установками Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE прекрасно “сшиваются” между собой, а также с данными других экспериментов. Следует отметить, что при низких энергиях наблюдается хорошее согласие данных TAIGA-HiSCORE и прямых измерений в спутниковых и баллонных экспериментах, а в высокоэнергичной части - достаточно хорошее согласие с данными огромных установок Pierre Auger Observatory и Telescope Array.

В 2020 году произведен физический пуск второго узкоугольного атмосферного черенковского телескопа изображения TAIGA-IACT. На рис. 30 фотография двух действующих телескопов в составе экспериментального комплекса TAIGA можно видеть оба действующих телескопа TAIGA-IACT.



Рис. 30. *Два действующих узкоугольных атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA.*

Каждый телескоп имеет составное зеркало общей площадью 10 м^2 , в фокусе которого располагается камера изображения из 560 пикселей - малогабаритных фотоумножителей XP1911В. Угол обзора камеры $9,6^\circ$, а у индивидуального пикселя – $0,36^\circ$. С помощью телескопов проведены наблюдения за локальными источниками гамма-квантов высоких энергий. Зарегистрированы события от Крабовидной туманности со статистической значимостью $6,2\sigma$ и от блазара Mrk421 со статистической значимостью более 5σ . На рис. 31 показан интегральный энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности в диапазоне энергий 4-50 ТэВ. Измеренный спектр хорошо согласуется с данными экспериментов HEGRA, MAGIC и VERITAS.

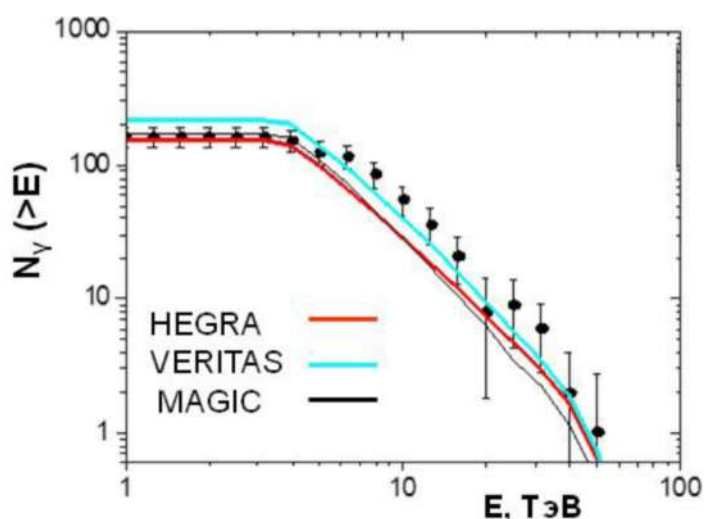


Рис. 31. *Интегральный энергетический спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности, полученный по данным телескопов TAIGA-IACT.*

Продолжается расширение сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE для регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней. На действующей части установки получено ограничение на диффузный поток гамма-квантов сверхвысоких энергий. Начата разработка телескопа TAIGA-IACT с камерой на основе кремниевых фотоумножителей.

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

Ожидаемая скорость резонансного поглощения аксионов ядром $^{83}\text{Kг}$ в зависимости от вероятности излучения аксиона в данном переходе (ω_A/ω_γ) , 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 γ -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 γ -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 $^{83}\text{Kг}$ до 99,9%. Рабочий объем счетчика составляет 8.77 л, давление газа — 1.8ат. Масса изотопа $^{83}\text{Kг}$ 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 107 раз по сравнению с поверхностью. За 2020г. набрана статистика за ~300 сут живого времени измерений. На данный момент набрана суммарная статистика за ~1000 сут измерений. Идет обработка полученных данных.

По предварительным результатам анализа измерений получено верхнее

ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона:

$|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.04 \times 10^{-17}$. В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов: $m_A \leq 12.4$ эВ (95% У.Д.).

При сотрудничестве с Воронежским государственным университетом получен образец кристалла твердого раствора GaS:Fe с содержанием железа ~5%. На данном этапе образцы изучаются на предмет возможности использования таких кристаллов в качестве мишени для эксперимента по поиску аксионов.

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

13.1. Создание установки PRISMA-LHAASO в рамках международной обсерватории LHAASO

В 2020 г. было проведено несколько совместных сеансов измерений установкой YBJHA в Тибете (Янгбаджинг, 4300 м) и прототипом установки P16-YBJ из 16 эндетекторов. В результате тестовых измерений была получена зависимость количества регистрируемых нейтронов от сезона наблюдений (рис. 32). Эта же зависимость изучалась и на первом работающем кластере установки ENDA, где для этой цели были установлены датчики влажности грунта вблизи детекторов. Там также получена величина эффекта порядка 10% для разницы «сухой» - «сырой» период.

Полученный результат свидетельствует о легком химическом составе космических лучей в указанной области энергий и хорошо согласуется с мировыми данными, полученными в прямых измерениях вне атмосферы при энергиях ниже 1 ПэВ. Параметр Y характеризует наклон экспоненциального распределения по e/p отношению в индивидуальных ливнях. Как видно из рисунка, полученный средний атомный номер первичных частиц лежит между гелием и азотом: $\langle A \rangle \approx 5-8$

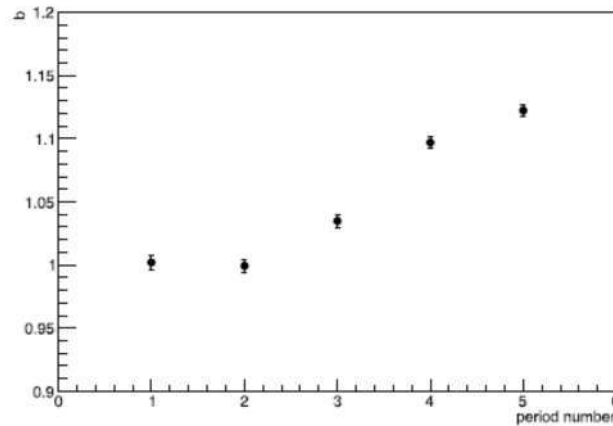


Fig. 5 Change of fitting parameter b with periods.

Рис. 32. *Количество регистрируемых нейтронов в зависимости от номера периода наблюдений.*

Начато создание полномасштабной установки ENDA в рамках международного проекта LHAASO. В содружестве 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.

После анализа предварительных данных по регистрации ШАЛ, было решено внести изменения в алгоритм отбора событий: заменить прошивку FADC и скорректировать онлайн программу.

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 ξ . 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 2020 г. была продолжена отладка и юстировка основного варианта программного пакета FANSY 2.0 QGSJ, с упором на моделирование взаимодействий мезонов в соответствии с экспериментальными результатами, полученными при низких ($\sqrt{s} = 17 - 63$ ГэВ). Кроме того, 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).

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 CPG, разработанной на основе базовой модели FANSY 2.0 QGSJ и воспроизводящей компланарную генерацию наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ) во взаимодействиях адронов с нуклонами при энергиях $E_0 > 10^{16}$ эВ ($\sqrt{s} > 5$ ТэВ), было проведено исследование возможной связи результатов экспериментов в космических лучах по явлению компланарности ЭВЧ с данными CMS по “ridge” эффекту. Анализировались двухчастичные корреляции в пространстве переменных $\Delta\eta - \Delta\phi$ корреляционной функции при $\Delta\phi \approx 0$ и $|\Delta\eta| \gtrsim 3.5$ в событиях с множественностью $n_{ch} > 90$.

Корреляционная функция определяется как функция отношения сигнал/фон следующим образом:

$$R(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \langle (\langle N \rangle - 1) \left(\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\varphi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\varphi)} - 1 \right) \rangle \quad (1)$$

Здесь $\Delta\eta = |\eta_1 - \eta_2|$, $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ – абсолютная величина различий в псевдобыстроотах η и азимутальных углах двух частиц φ , $\langle N \rangle$ – среднее число треков на одно событие, S_N и B_N – функции плотности сигнала и фона, определяемые выражениями (2) и (3), соответственно.

$$S_N(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \frac{2}{N(N-1)} \frac{d^2 N^{signal}}{d\Delta\eta d\Delta\varphi} \quad (2)$$

$$B_N(\Delta\eta, \Delta\varphi) = \frac{1}{N_1 N_2} \frac{d^2 N^{mixed}}{d\Delta\eta d\Delta\varphi} \quad (3)$$

Поскольку всегда $\Delta\eta > 0$ и $\Delta\varphi > 0$, то реально заполняется один квадрант $\Delta\eta$ – $\Delta\varphi$ распределения; остальные три квадранта заполняются отражением. Поэтому распределения симметричны относительно точки $(\Delta\eta, \Delta\varphi) = (0, 0)$ по определению, и для упрощения рисунка можно отрезать часть распределения без потери его информативности. Распределение функции плотности сигнала S_N в каждом событии определяется числом всех пар заряженных частиц с множественностью N , т.е. $N(N-1)/2$, и нормируется с его помощью на единичный интеграл. Фоновое распределение B_N построено путем случайного выбора двух различных событий и сопряжения каждой частицы из одного события с каждой частицей в другом событии с множественностями N_1 и N_2 , соответственно.

В рамках FANSY 2.0 CPG моделировались взаимодействия (без учета отклика детекторов) и был проведен анализ отобранных событий, аналогичный экспериментальной процедуре. Хотя моделирование отклика детектора не проводилось, от этого не меняется качественный вывод, а именно, что рамках модели FANSY 2.0 «ridge» эффект является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

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

ГВ-детектор ОГРАН состоит из акустического цилиндрического резонатора, соединенного с оптической полостью ФП (Фабри-Перо), образованной зеркалами, прикрепленными к торцам акустического цилиндра. Имеет место новое качество такой комбинации: (а) более сложная структура отклика на ГВ-сигнал, содержащая отдельно акустические и оптические части, и (б) возможность получения чувствительности на уровне акустических броуновских шумов в ограниченном спектральном частотном диапазоне, из-

за малого обратного флуктуационного влияния оптического считывания. Поскольку такой комбинированный опто-акустический детектор работает в зоне продольного акустического резонанса болванки, он неизбежно является узкополосным приемником. Однако ширина полосы приема зависит от уровня оптических (в пределах квантовых) шумов ФП интерферометра. Увеличивая оптическую добротность ФП резонатора (его резкость, или *finesse*) можно добиться заметного расширения полосы.

Новая модернизация для снижения шумового уровня и расширения полосы приема детектора выполнялась в 2020 г. Также была разработана методика и техника автоматического поддержания рабочего режима ОГРАН, необходимая для выполнения длительных наблюдений в режиме непрерывного мониторинга грави-градиентного наземного фона.

В процессе работы ОГРАН осуществляется непрерывная перестройка частоты лазера, которая необходима для двух целей: во-первых, для настройки на частоту оптической моды Фабри-Перо детектора; во-вторых, для удержания на центральной частоте моды цепью обратной связи.

В этой связи в отчетном году был усовершенствован программируемый аппаратный комплекс, позволяющий дистанционно управлять параметрами установки, а также автоматически поддерживать работу в режиме мониторинга.

На практике экспериментальная установка ОГРАН не может находиться в режиме полного захвата бесконечно. Самопроизвольный выход из захвата происходит в результате внешних электрических или сейсмических возмущений, перескока моды лазера, выхода рабочей точки за пределы динамического диапазона и т.д. Это возникает случайно независимо от оператора. Для устранения срывов в 2020 году была разработана и внедрена методика и техника автоматического восстановления захвата после срывов.

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)

Проведен детальный анализ грозового события 24-25 июля 2014 г., когда свечение ночного неба над установкой (наблюдаемое на расстоянии 75 км, село Хасанья на окраине Нальчика) было зарегистрировано на фоне магнитосферной бури. Для более глубокого анализа электромагнитных эффектов были дополнительно привлечены данные измерений

вариаций геомагнитного поля, произведённые на территории БНО и в удалении на 70 км в северо-западном направлении (Верхнекубанский полигон ВСЕГИГГЕО, пос. Эльбрусский, N43.55° E42.13°) силами Северокавказской геофизической лаборатории ИФЗ. Измерения магнитного поля проводились на идентичном оборудовании, выполненном по единой технологии. Этот факт позволил измерить локальное возмущение магнитного поля, на масштабе ~ 100 км, вызванное локальными токами. т. е. в системе литосфера - тропосфера – стратосфера - ионосфера в районе БНО. 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° с. ш.) над грозowymi очагами. Этот эффект проявляется в виде диффузного свечения типа «полярное сияние» яркостью $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ кд/м² и локальных возмущений электрического поля с характерной разностью потенциалов в тропосфере ± 100 МВ. Зарегистрировано локальное магнитное возмущение (~1 нТл), соответствующее возникновению локального вертикального тока в атмосфере, максимум которого совпал с началом взрывной фазы зарождения суббури. Картина этого события в деталях представлена на Рис. 33.

Во время другой магнитосферной бури 22.06.2015, внезапное начало которой сопровождалась Форбуш – понижением, отдельные установки, регистрирующие космические лучи на уровне земли (например, мюонный телескоп GRAPES-3 в Индии), зафиксировали положительное возмущение интенсивности частиц в период 19:00-22:00 UT. Исследование указанного всплеска на установке Ковер показало, что имело место очень необычное явление: медленный спуск в этот период большого отрицательного заряда из ионосферы на землю. Процесс сопровождался генерацией гамма-квантов с энергией 10 – 30 МэВ, и слабым свечением в оптическом диапазоне. Время спуска 9.5 минут. Электрическое состояние атмосферы было классифицировано как грозовое по росту давления, регистрации приземной напряжённости поля с амплитудой более 2 кВ/м (до 5 кВ/м), импульсного разряда в момент 21:51:10 LT, сопровождаемого резким спадом напряжённости приземного поля до нулевого значения, характерным для молниевых разрядов облако – земля. Однако, несмотря на явные элементы регистрации грозы, в этом случае присутствовали некоторые нехарактерные моменты для обычных конвективных гроз. Возможно, поле в атмосфере имело сейсмическое происхождение. На рисунке 34 представлены характеристики события 22.06.2015 г.

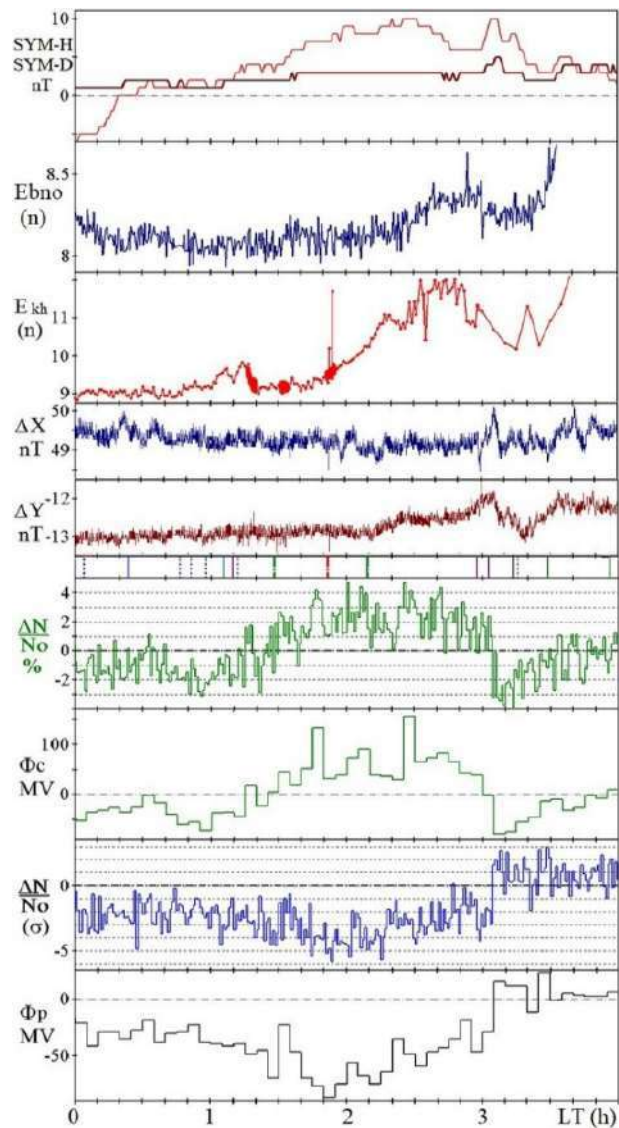


Рис. 33. Динамика электрических и магнитных полей в грозовом событии 24-25.07.2014. Описание сверху вниз: 1. Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (усреднение 1 минута), красным цветом – индекс SYM-H (направление на север), коричневый – индекс SYM-D (направление на восток). 2. Яркость (измерение в каналах) свечения области «тропосферы» в п. Нейтрино (усреднение 10 сек). 3. Яркость (измерение в каналах) свечения центральной области «ионосферы» в с. Хасанья (усреднение 10 сек). 4. Вариации локального магнитного поля в п. Нейтрино (X-компонента, направление на север) (усреднение 10 сек). 5. Вариации локального магнитного поля в п. Нейтрино (Y-компонента, направление на восток) (усреднение 10 сек). 6. 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. 7. Вариации «вертикальных» мюонов (усреднение 1 мин.). 8. Восстановленная по

вариациям «вертикальных» мюонов разность потенциалов в тропосфере над установкой (усреднение 5 мин). 9. Вариации «перифирийных» (наклонных) мюонов (усреднение 1 мин). 10. Средняя разность потенциалов в тропосфере вдали от установки на расстоянии более 10 км (усреднение 5 мин).

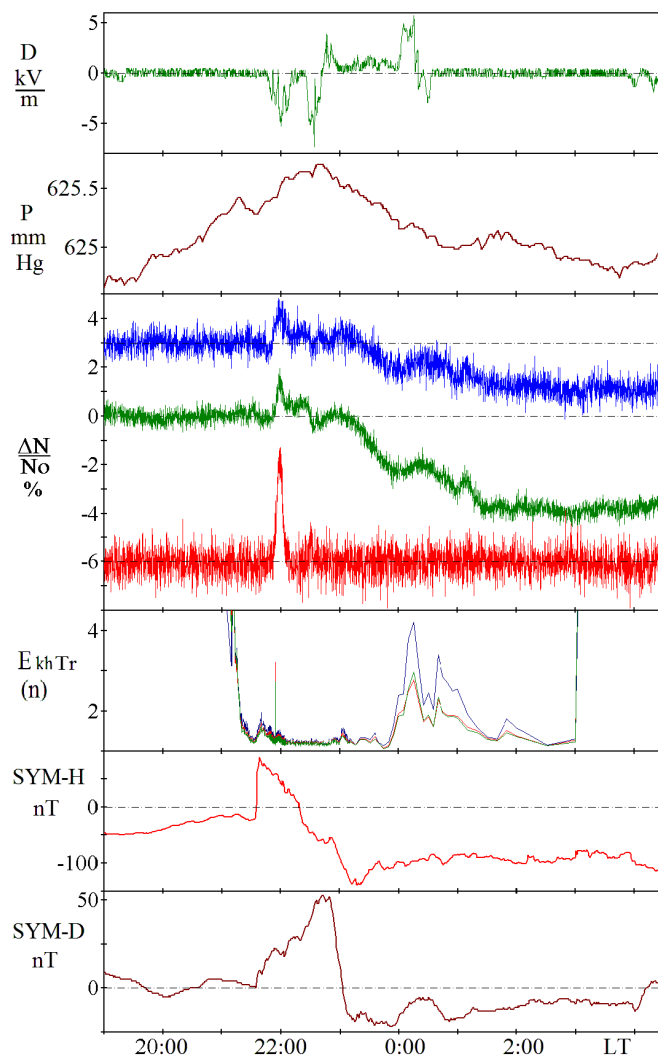


Рис. 34. Грозовое событие 22.06.2015 г., проходившее на фоне магнитосферной суббури с внезапным началом во время землетрясения (36.79 N 27.84 E 22.06.2015, 18:33:54 UT, 2 км, M2.1) и Форбуш-понижения с началом в 19:30 UT. Везде, где не оговорено специально, усреднение 10 с. 1. Приземное электрическое поле. 2. Атмосферное давление. 3. Вариации интенсивности вторичных частиц космических лучей. Сверху вниз: вариации «перифирийных» (наклонных) мюонов (смещение +3%, $E > 100$ МэВ), вариации «вертикальных» мюонов ($E > 100$ МэВ), вариации электронно – фотонной компоненты (смещение -6%, 10 МэВ $< E < 30$ МэВ). 4. Яркость свечения (RGB представление цвета, измерение в каналах) центральной области «тропосфера» в с. Хасанья. Сверху вниз: синий (B), красный

(R), зелёный (G). Точками обозначены моменты измерения (серии 4 посекундных измерений со скважностью 1 мин.). 5. Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (скважность 1 минута), индекс SYM-H, получено с ресурса http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php (направление на север). 6. Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (скважность 1 минута), индекс SYM-D (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (направление на восток).

Таким образом, в рассмотренных событиях (24-25.07.2014 г. и 22.06.2015 г.) проявляется сложная связь сейсмической и грозовой активности в горном регионе на фоне магнитосферных возмущений. Несмотря на совершенно разную типологию событий, в обоих случаях имеет место передача заряда между землёй и ионосферой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

План работ на 2020 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 2021 г.

По результатам исследований по теме Задачи 1 в 2020 году были опубликованы статьи и доклады 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 2020 год выполнен полностью.

База экспериментальных данных пополнилась за счет непрерывного набора в течение 2020 года. Часть данных 2020 года обработана и подготовлена для анализа и поиска событий, связанных с астрофизическими нейтрино высоких энергий.

По результатам исследований по теме Задачи 2 в 2020 г. было опубликовано статей и два доклада на международных конференциях.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

В результате физического и компьютерного моделирования установлены все параметры системы сбора данных запущенного в эксплуатацию в 2020 году телескопа *Vaikal-GVD* из 7 кластеров.

По результатам исследований по теме Задачи 3 в 2020 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 2020 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 4 в 2020 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 2020 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 5 в 2020 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 2020 год выполнен полностью.

Результаты исследований по теме Задачи 6 в 2020 году не публиковались из-за необходимости дальнейшего накопления данных и исследований с целью подавления фоновых событий.

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 2020 год выполнен полностью.

Выполнены тесты и проверки всех систем эксперимента. Изготовлены изотопы ^{37}Ar , ^{71}Ge , с использованием которых были измерены объемные и пиковые эффективности пропорциональных счетчиков, получены оценки времен нарастания фронта импульсов от распадов ^{71}Ge для каждого пропорционального счетчика.

На данный момент в эксперименте завершается сравнительный анализ данных и оценка всех систематических неопределенностей измерений.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Проведено моделирование эксперимента ББНТ методом Монте-Карло для выбора оптимальной конфигурации. При этом надо иметь в виду, что окончательный выбор формы емкости телескопа для сцинтиллятора будет зависеть от геологии окружающих горных пород и требований подземной инженерии.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

В 2020 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 18.56 г. на 90% уровне достоверности.

Проводился поиск коррелированных событий нейтринных детекторов LVD и БПСТ во время сигнала от слияния нейтронных звезд GW170817

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Проводились работы по организации передачи сообщений о кандидатах на нейтринный всплеск в мировую коллапсную сеть SNEWS, которая в 2020 году переходила на новый формат (SNEWS2.0). В настоящее время ведется тестирование соединения со SNEWS2.0.

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 2020 год выполнен полностью.

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

Выполнено наиболее прецизионное измерение энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне 10^{15} - 10^{18} эВ на черенковской установке Tunka-133 экспериментального комплекса TAIGA. На установке TAIGA-HiSCORE измерение энергетического спектра первичного космического излучения в диапазоне 2×10^{14} - 10^{16} эВ. Успешно произведен физический запуск второго узкоугольного атмосферного черенковского телескопа изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA. Зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от Крабовидной туманности со статистической значимостью более 6σ и измерен их энергетический спектр. Зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от внегалактического источника блазара Mrk421 со статистической значимостью более 5σ .

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

В 2020 г был продолжен эксперимент с ^{83}Kr . По предварительным результатам анализа данных, набранных за ~ 1000 дней живого времени измерений, получено верхнее ограничение на модуль произведения аксион-фотонной константы связи на массу аксиона: $|g_{A\gamma} \times m_A| \leq 6.04 \times 10^{-17}$. В модели адронных аксионов это соответствует ограничению на массу аксионов: $m_A \leq 12.4$ эВ (95% У.Д.). Измерения с ^{83}Kr продолжаются.

Поиск материалов содержащего ^{57}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 2020 год выполнен полностью.

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

В результате выполненных в 2020 г. работ были протестированы и усовершенствованы все узлы создаваемой установки ENDA. По полученным ранее экспериментальным данным проведено измерения спектра состава космических лучей. Получен предварительный результат, согласующийся с мировыми данными при энергиях выше 20 ПэВ. В ходе непрерывного мониторинга природного потока тепловых нейтронов с помощью эн-детекторов, обнаружены новые эффекты в подземной физике и в физике аэрозолей.

Получены выдающиеся результаты в рамках коллаборации LHAASO: измерен энергетический спектр гамма-квантов от источника в Крабовидной туманности в области 100 – 1000 ТэВ, и обнаружен новый источник гамма-квантов в окрестности созвездия Лебедь с энергиями выше 1 ПэВ – ПэВатрон в нашей галактике. Благодаря очень высокой светосиле установки на ней уже открыты около 10 ранее неизвестных источников в нашей галактике.

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 2020 год выполнен полностью.

Проведены исследования анизотропии 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 2020 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 в части моделирования мезон-протонных взаимодействий при низких энергиях ускорителей, а именно – основных

характеристик взаимодействий мезон-протон, генерации 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).

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Показано, что в рамках модели FANSY 2.0 «ridge» эффект, который не объясняется ни одной из существующих теоретических моделей, является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц.

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Сформулированы пути модернизации установки ОГРАН для устранения избыточных шумов и наводок. Частично выполнена намеченная модернизация, которую планируется закончить в первой половине 2021 года. Проведены работы по системам автоматической подстройки рабочего режима посредством специализированного операционного вычислительного комплекса и исполнительных роботов. Методика была апробирована на пилотной модели ОГРАН и выполняется её перенос на основную антенну. Также была организована совместная работа ОГРАН и подземного сцинтилляционного телескопа БПСТ.

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 2020 год выполнен полностью.

Установлено, что во время магнитосферных суббурь малой мощности, на предварительной стадии и в начале фазы развития, возможно проникновение магнитосферно – ионосферных возмущений на средние широты ($\sim 40^\circ$ с. ш.) над грозowymi очагами.

На основе анализа событий 24-25.07.2014 г. и 22.06.2015 г. обнаружена сложная связь сейсмической и грозовой активности в горном регионе на фоне магнитосферных возмущений. Несмотря на совершенно разную типологию событий, в обоих случаях имеет место передача заряда между землёй и ионосферой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200, BAIKAL Collaboration (A.D. Avrorin (Moscow, INR) et al.). Dec 3, 2015. 9 pp. Published in *Astropart.Phys.* 81 (2016) 12-20 DOI: 10.1016/j.astropartphys.2016.04.004 e-Print: arXiv:1512.01198 [astro-ph.HE]
- [2] Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo., A.D. Avrorin (Moscow, INR) et al.. Dec 11, 2014. 6 pp. Published in *JETP Lett.* 101 (2015) no.5, 289-294 DOI: 10.1134/S0021364015050021 e-Print: arXiv:1412.3672 [astro-ph.HE]
- [3] A.D. Avrorin (Moscow, INR) 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]
- [4] A.D. Avrorin (Moscow, INR) et al. "Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200", *J.Exp.Theor.Phys.* 125 (2017) no.1, 80-90, *Zh.Eksp.Teor.Fiz.* 152 (2017) no.1, 97-109; DOI: 10.1134/S1063776117070135; e-Print: arXiv:1612.03836 [astro-ph.HE]
- [5] K. N. Abazajian et al., (2012), arXiv:1204.5379 [hep-ph], pp.170-175.
- [6] J. P. Kozlova, E. P. Veretenkin, V.N.Gavrin, A. I. Zvir, T. V. Ibragimova, and V. A. Tarasov, Measurement of Activity of an Artificial Neutrino Source in the Best Experiment by the Calorimetric Method, *Physics of Atomic Nuclei*, 2020, Vol. 83, No. 6, pp. 958–961.
- [7] А.Г. Антоненко, В.П. Борщевский, Р.И. Еникеев, О.В. Очкас, О.Г. Рязская, Л.В. Чернышов, А.П. Ярош, Н.А. Ярош «Сорок лет Артемовскому сцинтилляционному детектору нейтрино» *Ядерная Физика* (2018) т. 81 №1, 78-84
- [8] N.Y. Agafonova et al. (LVD Collaboration) "Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector" *The Astrophysical Journal* (2015), 802:47

ПУБЛИКАЦИИ

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

1. А.В. Аврорин и др., "Эксперимент Baikal-GVD", Ядерная Физика, том 83, номер 6, стр 511-517, 2020; DOI: 10.31857/S0044002720060045.

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

2. Olga Suvorova et al., "Recent progress of the Baikal-GVD project", PoS EPS-HEP2019 (2020) 050; DOI: 10.22323/1.364.0050

3. Моделирование физических процессов и работы установки Baikal-GVD

3. Dmitry Zaborov et al., "High-energy neutrino astronomy and the Baikal-GVD neutrino telescope", 2020; arXiv:2011.09209; to be published in Proc. of the 5th IC Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020).

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

4. Grigory Safronov et al., "Baikal-GVD: status and first results", Proc. of the 40th ICHEP, 2020; <https://pos.sissa.it/390/606/pdf>; arXiv: 2012.03373.
5. R&MM "Cosmic Rays and Neutrinos in the Multi-Messenger Era" zoom-conference, 7-11 December 2020 IPGP, Paris.
6. Секция ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», 10-12 – Март 2020, Международная сессия-конференция, Новосибирск, Россия. "Эксперимент Baikal-GVD", Г.Б. Сафронов; <https://indico.inp.nsk.su/event/26/timetable/#all.detailed>

5. Поиск источников и исследования природы астрофизических нейтрино высоких энергий

7. А.В. Аврорин и др., "Слежение за высокоэнергичными нейтрино на Байкальском нейтринном телескопе ВАИКАЛ-GVD", Статья принята к публикации 28 ноября 2020 в журнал Письма в Астрономический Журнал и будет опубликована в т. 47, номер 02, 2021 г.
8. The 5th International conference on particle physics and astrophysics, ICPPA-2020, 5 - 9 October 2020 МЕРФИ, Russia, zoom meeting; D.Zaborov for Baikal-GVD Collaboration, "High-energy neutrino astronomy and the Baikal-GVD neutrino telescope", <https://indico.particle.mephi.ru/event/35/>.

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

9. 40th International Conference on High Energy Physics, ICHEP2020, 28 July- 6 Aug 2020, zoom meeting; “Status of Baikal-GVD: results of track reconstruction”, G.Safronov for Baikal-GVD Collaboration, <https://indico.cern.ch/event/868940/contributions/3813595/>.
10. 36 Всероссийская конференция по космическим лучам, 28 Sep -2 Oct 2020, “Статус Baikal-GVD”, Г.В. Домогацкий, <https://events.sinp.msu.ru/event/3/contributions/126/>.

7. Публикации по задаче «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».

11. J. P. Kozlova, E. P. Veretenkin, V.N.Gavrin, A. I. Zvir, T. V. Ibragimova, and V. A. Tarasov, “Measurement of Activity of an Artificial Neutrino Source in the Best Experiment by the Calorimetric Method”, Physics of Atomic Nuclei (2020) Vol. 83, No. 6, pp. 958–961.
12. V.Gavrin «SAGE and BEST», Neutrino 2020 - Virtual Meeting, June 22-July 2, 2020. <https://zenodo.org/communities/neutrino2020-alks/search?page=1&size=20&q=Gavrin>
13. V. N. Gavrin «BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) current status», Сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, Новосибирск, Март 10-12, 2020. <https://indico.inp.nsk.su/event/26/contributions/1090/>
14. J.P. Kozlova, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, V.A. Tarasov, E.P.Veretenkin, A.I. Zvir, Measurement of Neutrino Source Activity in the Experiment BEST by Calorimetric Method, доклад на сессии-конференции СЯФ ОФН РАН, Новосибирск, 10-12 марта 2020г. <https://indico.inp.nsk.su/event/26/contributions/1108/attachments/671/794/19.03.pdf>
15. Gorbachev V V, Gavrin V N, Ibragimova T V, and Shikhin A A «Estimation of radioactive impurities in the ^{51}Cr source from photon radiation measurements in the BEST experiment», XXXV International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2020), Kabardino-Balkar Republic of the Russian Federation, March 1-6, 2020. <http://www.ihed.ras.ru/elbrus20/program/program.php?section=7&day=3>, <http://www.ihed.ras.ru/elbrus20/program/restore.php?id=289>

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

17. Malyshkin, Yu M., et al. "Modeling of a MeV-scale particle detector based on organic liquid scintillator." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 951 (2020): 162920.
18. Petkov, V. B., et al. "Baksan large volume scintillation telescope: a current status." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1468. No. 1. 2020.

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

19. Irina Shakyrianova (on behalf of the LVD Collaboration) "LVD Status report: neutrino physics", *J. Phys.: Conf. Ser.* 1690 012175 (2020) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1690/1/012175.
20. N. Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakyrianova, V.F. Yakushev and LVD Collaboration "LVD is the detector for study the astroparticle and cosmic ray physics and to search for neutrino radiation from collapsing stars" *Proc. of 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics 2019* (2020).
21. N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakyrianova (on behalf of the LVD Collaboration); and M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenaya, R.V. Novoseltseva, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin (the BUST Collaboration) "Joint an alysis of data from neutrino detectors LVD and BUST during the event GW170817" *Proc. of 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics 2019* (2020).
22. I. Alikhanov, "Charged lepton beams as a source of effective neutrinos", *EPL* 129 (2020) 11003.
23. I. Alikhanov, "Probing the Glashow resonance at electron-positron colliders", *Mod. Phys. Lett. A* 35 (2020) 2050101.

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

24. Yu.F. Novoseltsev, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenaya, 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
25. V.B. Petkov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenaya, 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. *Journal of Physics: Conference Series* 1468 (2020) 012164

- 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».**
26. N.M. Budnev, et al. “The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array”, *Astroparticle physics*. 117(2020)102406.
27. 2. L. Kuzmichev, 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*, 2020. V.952. 161830.
28. 3. I. Astapov, 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*, 2020. V.952. 161730.
29. 4. N.M. Budnev, et al. “TAIGA – A Hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, 2020. V.958. 162113.
30. 5. N. Budnev, et al. “TAIGA – an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and gamma-ray astronomy in the Tunka Valley”, *JINST*. 2020. V.15. N.9. C09031.
31. 6. I. Astapov, et al. “An approach for identification of ultrahigh energy extensive air showers with scintillation detectors of TAIGA experiment”, *JINST*. 2020. V.15. N.9. C09037.
32. 7. A. Ivanova, et al. “Design features and data acquisition system of the TAIGA-Muon scintillation array”, *JINST*. 2020. 15. 06. C06057.
33. 8. D.Chernov, et. al. “Development of a novel wide-angle gamma-ray imaging air Cherenkov telescope with SIPM-based camera for the TAIGA hybrid installation”, *JINST*. 2020. Vol.15. N.9. C09062.
34. 9. A. Ivanova, et al. “Possibilities of the Tunka-Grande and TAIGA-Muon scintillation arrays with the TAIGA-HiSCORE Cherenkov array joint operation in the research of cosmic and gamma rays”, *Journal of Physics: Conference Series*. 1690(2020)012014.
35. 10. E.B. Postnikov, et al., “First detection of gamma-ray sources at TeV energies with the first imaging air Cherenkov telescope of the TAIGA installation”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1690(2020)012023.
36. 11. R. Monkhoev, et al., “Tunka-Grande and TAIGA-Muon scintillation arrays: status and prospects”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1697(2020)012026.

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

37. Международная конференция Neutrino 2020, 22.06 – 02.07 2020г, A. Derbin et al. “A search for resonant absorption of solar axions by ^{83}Kr “, постерный доклад <https://nusoft.fnal.gov/nova/nu2020postersession/pdf/posterPDF-401.pdf>

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

38. Mao-Yuan Liu et al. “Performance of the thermal neutron detector array in Yangbajing, Tibet for cosmic ray EAS detection.”, *Astrophys Space Sci.* (2020) 365:123.
39. F. Aharonian, Q. An, et al. (LHAASO collaboration). “Observation of the Crab Nebula with LHAASO-KM2A - a performance study.”, *Chinese Physics C* (2021), V. 45, No 2
40. Aharonian, F. et al. (LHAASO collaboration). “Prospects for a multi-TeV gamma-ray sky survey with the LHAASO water Cherenkov detector array.”, *Chinese Physics C* (2020) 44(6), 065001.
41. O Shchegolev, V Alekseenko, D Kuleshov, K Levochkin, Yu Stenkin. and V Stepanov. “Performances of ENDA-INR prototype array.” *J. Phys.: Conf. Ser.* (2020) 1690 012011.
42. O.B. Shchegolev F.A.Bogdanov, Z.T. Izhbulyakova, D. M. Gromushkin, and Yu. V. Stenkin. “Primary cosmic ray energy spectrum above the "knee" measured with PRISMA-32 array.”, *Physics of Atomic Nuclei*, 2020, Vol. 83, No. 2, pp. 290–293.

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

43. Telescope Array Collaboration, «Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment», *The Astrophysical Journal Letters* (2020) 898, L28

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»

44. R.A. Mukhamedshin. FANSY 2.0: a Monte Carlo tool for study of superhigh-energy cosmic-ray interactions: meson–proton interactions. *Eur. Phys. J. Plus* 136, 17 (2021). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00985-6>

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

45. Р.А. Мухамедшин. О связи между коллайдерным «ridge»-эффектом и компланарностью частиц в космических лучах. 36 Всероссийская конференция по космическим лучам (Москва) 28 сентября – 2 октября 2020 (устный доклад). Принят к публикации в *Изв. РАН, сер. Физ.*

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

46. V. N. Rudenko, Yu. M. Gavriluk, A. V. Gusev, D. P. Krichevskiy, S. I. Oreshkin, S. M. Popov and I.S. Yudin. Gravitational wave detector OGRAN as multi-messenger project of RAS-MSU. International Journal of Modern Physics A, Vol. 35, No. 02n03, p.2040007 (2020) Classical and Quantum Gravity. <https://doi.org/10.1142/S0217751X20400072>
47. Орешкин С.И., Гусев А.В., Гаврилюк Ю.М., Кричевский Д.П., Попов С.М., Руденко В.Н., Юдин И.С. «Гравитационный детектор ОГРАН как проект мультиканальной астрономии РАН — МГУ» Альманах современной метрологии,, (2020), том 24, № 4
48. Руденко В.Н., Кувшинский М.В., Орешкин С.И., Руденко К.В., Попов С.М., Юдин И.С. «Криогенные фабри–перо резонаторы с зеркалами на подложках различных оптических материалов», Альманах современной метрологии, (2020), том 24, № 4, с. 285-295
49. Орешкин С.И., Попов С.М., Руденко В.Н., Самойленко А.А., Юдин И.С., Квашнин Н.Л., Луговой А.В., Скворцов М.Н. «Модернизация и методика удержания рабочего режима установки ОГРАН (Оптоакустическая Гравитационная Антенна)». Ядерная физика и инжиниринг, (2020), том 11, № 1

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»

50. N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky, M.N. Khaerdinov, «Variations of cosmic ray muon flux during thunderstorms as a tool for studying electric field distribution and particle production processes in the atmosphere», Journal of Physics: Conference Series 1468 (2020) 12100 doi:10.1088/1742-6596/1468/1/012100
51. Н. С. Хаердинов, Д. Д. Джаппуев, К. Х. Канониди, А.У. Куджаев, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов, «Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике гроз», XI Международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» 22 - 25 сентября 2020 г., Паратунка, Камчатский край.