

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
Per. № 125071408380-7
Per. №



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«30» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АСТРОФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ,
НЕФОТОННАЯ АСТРОНОМИЯ, ФИЗИКА И ТЕХНИКА НЕЙТРИННЫХ
ТЕЛЕСКОПОВ В НИЗКОФОНОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ
ЛАБОРАТОРИЯХ

(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

Руководитель НИР,
Зам. директора ИЯИ РАН.,
д-р. физ.-мат. наук,
чл.-корр. РАН

30.12.2025 Г.И. Рубцов

подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
зам. директора,
д-р физ.-мат. наук,
чл.-корр. РАН


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Г.И. Рубцов
(введение, заключение)

Исполнители:
Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Ж.-А.М. Джилкибаев
(введение, разделы 1, 2, 3, 4,
заключение)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук,
академик РАН


_____ 30.12.2025
подпись, дата

В.Н. Гаврин
(введение, разделы 5, 6,
заключение)

Гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Л.Б. Безруков
(введение, разделы 7, 8,
заключение)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

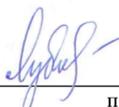
Н.Ю. Агафонова
(введение, разделы 9, 10,
заключение)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Ю.В. Стенькин
(введение, разделы 11, 12, 15,
заключение)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(введение, разделы 11, 12, 15,
заключение)

Зам. зав. БНО,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

А.М. Гангапшев
(введение, раздел 13, заключение)

Зав. БНО,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

В.Б. Петков
(введение, разделы 14, 19, 20
заключение)

Ст. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

М.Ю. Кузнецов
(введение, раздел 15, заключение)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

Р.А. Мухамедшин
(введение, разделы 16, 17, 18,
заключение)

Вед. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук


_____ 30.12.2025
подпись, дата

А.С. Лидванский
(введение, раздел 21, заключение)

Нормоконтроль



30.12.2025

О.Н. Либанова

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 125 с., 1 кн., 27 рис., 1 табл., 80 источн., 1 прил.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ГАММА-АСТРОНОМИЯ, НЕЙТРИНО, ПЭВАТРОНЫ, TAIGA, LHAASO, АКСИОНЫ, ГГНТ, ББНТ, БАЙКАЛ-GVD, ШАЛ, АТМОСФЕРНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ, ДИФФУЗНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ, ОГРАН, FANSY-2.0, КОВЕР-3, БПСТ, LVD, ENDA, МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ

Объектами исследования являются потоки космических лучей сверхвысоких энергий, гамма-квантов и нейтрино астрофизического происхождения, а также физические процессы их генерации и взаимодействия. Исследования проводятся на базе уникальных наземных, подземных и подводных установок: Baikal-GVD, TAIGA, LHAASO, Ковер-3, БПСТ и др.

Цель работы – решение фундаментальной проблемы происхождения космических лучей в рамках исследований на установках мирового уровня. Это включает поиск и изучение ПэВатронов, измерение спектра и массового состава космических лучей, регистрацию нейтрино и гамма-квантов высоких энергий, а также развитие соответствующих детектирующих систем, методов анализа данных и теоретических моделей.

Методы или методология проведения работы. В работе использован комплекс экспериментальных, аналитических и теоретических методов. Разрабатываются и внедряются передовые экспериментальные технологии, средства распределенного хранения и потоковой обработки больших данных, моделирование экспериментов методом Монте-Карло и анализ данных с применением методов машинного обучения.

В результате исследования получен ряд уникальных результатов мирового уровня: подтверждено открытие новых галактических источников гамма-излучения вплоть до ~ 2.5 ПэВ на LHAASO, на Baikal-GVD установлено одно из наиболее строгих в мире ограничений на диффузный поток астрофизических нейтрино выше 10 ПэВ и др.

Область применения результатов – фундаментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, физики частиц и космических лучей, нейтринной и гамма-астрономии, гравитационно-волновой астрономии.

Рекомендации по внедрению или итоги внедрения результатов – разработанные детекторные технологии, программные комплексы и методы анализа данных широко используются в рамках проводимых экспериментов.

Значимость работы заключается в получении прорывных экспериментальных данных и разработке и реализации новых методов в изучении космических лучей и мультимессенджерной астрономии в экспериментах мирового уровня.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. Увеличение эффективного объема глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.....	24
1.1. Методология выполнения исследования.....	24
1.2. Результаты исследований.....	24
1.3. Применение и значимость результатов исследования.....	26
2. Непрерывный набор, сохранение и анализ экспериментальных данных.....	27
2.1. Методология выполнения исследования.....	27
2.2. Результаты исследований.....	28
2.3. Применение и значимость результатов исследований.....	28
3. Получение статистически обеспеченного результата в исследовании глобального диффузного потока нейтрино высоких энергий астрофизической природы	30
3.1. Методология выполнения исследования.....	30
3.2. Результаты исследований.....	30
3.3. Применение и значимость результатов исследования.....	31
4. Разработка и внедрение методов долговременного хранения и обеспечения доступа к данным Baikal-GVD.....	32
4.1. Методология выполнения исследования.....	32
4.2. Результаты исследований.....	32
4.3. Применение и значимость результатов исследований.....	33
5. Подготовка установок и систем УНУ ГГНТ к проведению экспериментов с высокоинтенсивными источниками нейтрино и антинейтрино	34
5.1. Проверка химико-технологических и счетных систем ГГНТ	34
5.2. Замена и дооснащение оборудования систем ГГНТ	34
5.3. Разработка и проведение плана модернизации систем ГГНТ и галлиевой мишени для проведения измерений с источниками.....	36
5.3.1. Модернизация галлиевой мишени ГГНТ.....	37
5.3.1.1. Форма зон мишени в двухзонном эксперименте BEST	37
5.3.1.2. Форма зон мишени в трехзонном эксперименте BEST-2.....	38
5.3.1.3. Оптимизация формы зон мишени в трехзонном эксперименте BEST-2	39
5.3.1.4. Преимущество комбинированной оболочки	41
6. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ.....	43

7. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле	44
8. Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц $^{1/2}$ к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций .46	
8.1. Результаты эксплуатации оптоакустической гравитационной антенны ОГРАН в режиме длительных наблюдений и поиска нейтрино - гравитационных корреляций	46
8.2. Регистрация астро-геофизических возмущений кольцевым лазерным интерферометром (Гироскоп Саньяка), результаты эксплуатации Гироскопа Саньяка ..	50
8.3. Обсуждение результатов мониторинга гравитационно-волновых всплесков	54
9. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторе LVD (Гран Сассо, LNGS)	56
9.1. Детектор для регистрации нейтрино от вспышек Сверхновых	56
9.2. Обработка и анализ экспериментальных данных в режиме on-line	56
9.3. Методы и проблемы поиска вспышек сверхновых в режиме off-line	57
9.4. Результаты поиска нейтрино от вспышек сверхновых в режиме off-line	58
10. Поиск совпадений нейтринных событий LVD (Гран Сассо, LNGS) с событиями от астрофизических источников	60
10.1. Возможные астрофизические источники нейтрино	60
10.2. Поиск астрофизических нейтрино с помощью детектора LVD	60
11. Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ	63
12. Мониторинг известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO	64
13. Тестовые измерения с первым образцом пропорционального счетчика с катодом из железа	66
13.1. Подключение счетчика к газо-вакуумной системе и проведение тестовых измерений	66
13.2. Изучение рабочих характеристик счетчика	66
13.3. Изучение резонансного поглощения в изотопе Fe-57	67
14. Развертывание и эксплуатация установки «Ковер-3». Запуск в работу установки «Ковер-3», обеспечение работоспособности установки, проведение набора информации по регистрации кандидатов в фотонные ливни сверхвысокой энергии, поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических источников	68
15. Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO и Telescope Array	71

15.1.	Результаты, полученные на установках TAIGA и LHAASO.....	71
15.2.	Космогенное происхождение нейтрино KM3-230213A.....	72
16.	Усовершенствование модели FANSY 2.0/2D с компланарной генерацией частиц в 2D пространстве во взаимодействиях протонов ПКИ при энергиях выше 1 ПэВ	74
16.1.	Необходимость разработки новых моделей	74
16.2.	Программный пакет FANSY 2.0	74
17.	Моделирование развития стволов ШАЛ от частиц ПКИ на основе пакетов FANSY 2.0 и CORSIKA.....	76
17.1.	Необходимость изучения фрагментационной области	76
17.2.	Методы анализа азимутальных характеристик событий	77
18.	Исследование азимутальных характеристик наиболее энергичных потоков в стволах ШАЛ	80
18.1.	Основные критерии моделирования ШАЛ.....	80
18.2.	Моделирование характеристик ШАЛ в рамках традиционных моделей.....	80
18.3.	Азимутальные характеристики ШАЛ в версиях QGSJ и 2D модели FANSY 2.0.....	82
19.	Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации нейтринных вспышек от взрывов сверхновых звёзд с коллапсом ядра, мониторингирование потоков нейтрино от коллапсирующих звезд и поиск редких нейтринных событий от Галактических источников	87
20.	Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино	90
21.	Результаты исследования корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов	91
21.1.	Анализ экспериментального материала	91
21.2.	Модель происхождения вариаций сейсмического электрического тока в литосфере.....	99
21.3.	Обсуждение результатов.....	102
21.4.	Выводы	103
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	104
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	112
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	119

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Увеличение эффективного объема глубоководного нейтринного телескопа 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, Baikal-GVD в озере Байкал и проект KM3NeT в Средиземном море.

В 2025 году в озере Байкал был установлен новый четырнадцатый кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD. С его вводом в режим регистрации данных рабочий объем телескопа достиг значения $0,7 \text{ км}^3$ в задаче регистрации ливней от нейтрино высоких энергий астрофизической природы с энергиями выше 100 ТэВ. В настоящий момент времени Baikal-GVD является крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария. В течение года также были проведены работы по разработке, изготовлению и долговременным лабораторным испытаниям электронных систем телескопа для установки 15 и 16 кластеров в 2026 году. Для обеспечения производства работ по увеличению объема телескопа был проведен комплекс мероприятий по развитию инфраструктуры Байкальского нейтринного телескопа.

2. Задача «Непрерывный набор, сохранение и анализ экспериментальных данных»

Характерный темп счёта триггерной системы одного кластера Baikal-GVD составляет десятки герц. После установки 14го кластера Baikal-GVD в ходе зимней экспедиции, поток данных с телескопа вырос до 500 Гб/сутки. Данные накапливаются в береговом хранилище и передаются для дальнейшей обработки и долговременного хранения в ЛИТ ОИЯИ.

Потоковый анализ экспериментальных данных реализован двумя способами: быстрым (пофайловым) с задержкой от регистрации события до восстановления его характеристик до 10 минут и стандартным (порановым) с задержкой до 24 часов. Кроме того, реализован оффлайн режим обработки данных. В результате был сформирован банк нейтринных событий в трековом канале по результатам 5-летнего набора данных, набранных в период с апреля 2019 года по март 2024 года.

3. Задача «Получение статистически обеспеченного результата в исследовании глобального диффузного потока нейтрино высоких энергий астрофизической природы»

В 2023 году в эксперименте KM3NeT зарегистрировано нейтрино с энергией выше 100 ПэВ (событие KM3-230213A). Данное событие может принадлежать потоку космогенных нейтрино, либо оно испущено локальным источником нейтрино сверхвысоких энергий. Ранее в эксперименте IceCube и на наземной установке по регистрации широких атмосферных ливней PAO (Auger) были получены ограничения сверху на величину диффузного потока нейтрино в области энергий выше десятков ПэВ. В настоящее время Байкальский нейтринный телескоп обладает чувствительностью к диффузному потоку нейтрино сопоставимой с чувствительностью IceCube.

В 2025 году в Коллаборации “Байкал” была разработана методика выделения каскадных событий от нейтрино сверхвысоких энергий астрофизической природы в области энергий выше 10 ПэВ из данных нейтринного телескопа Baikal-GVD. Данная методика была использована для выделения событий астрофизической природы из набора экспериментальных данных накопленных в течении 2018-2023 г.г. В результате анализа данных не были выявлены события, удовлетворяющие использованным в анализе критериям отбора. Исходя из этого факта, нами получено одно из наиболее строгих на сегодняшний день ограничений на величину потока космогенных нейтрино в области энергий выше 10 ПэВ. Данный результат является уникальным результатом мирового уровня, который вошел в список важнейших результатов ИЯИ РАН за 2025 год.

4. Задача «Разработка и внедрение методов долговременного хранения и обеспечения доступа к данным Baikal-GVD»

Современные нейтринные телескопы, такие как Baikal-GVD, формируют непрерывный поток «сырых» данных. Долговременное хранение и резервирование этих данных имеет принципиальное значение для обеспечения воспроизводимости полученных результатов, а также проведения последующих, не потоковых анализов. Для Baikal-GVD это означает долговременное хранение всех сеансов набора данных, начиная с первых лет работы телескопа, при постоянном росте объёма поступающей информации и изменении конфигурации детектора. К данным одновременно предъявляются противоречивые требования: надёжность и защищённость от потерь, быстрый доступ для оперативной обработки и мониторинга, а также возможность длительного архивного хранения.

Для решения этой задачи используются несколько независимых центров хранения данных:

- основное, облачное хранилище файлов предоставляет быстрый доступ для обработки данных;

- ленточное хранилище обеспечивает возможность надёжной и отказоустойчивой архивации накопленных данных;
- резервное хранилище предоставляет географически удалённую площадку, обеспечивающую сохранность набранных данных даже в случае катастрофического отказа основного и ленточного хранилищ.

5. Задача «Подготовка установок УНУ ГГНТ к проведению экспериментов с высокоинтенсивными источниками нейтрино и антинейтрино. Разработка систем измерения активности источников, разработка и проведение плана модернизации систем ГГНТ и галлиевой мишени для проведения измерений с источниками с целью исключить или усилить галлиевую аномалию, и дать дополнительные доказательства, являются ли осцилляции в стерильные нейтрино наиболее вероятным ее решением»

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 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 масштабom массы порядка 1 эВ [1]. Институтом ядерных исследований РАН совместно с АО «ГНЦ НИИАР» Госкорпорации «Росатом» в БНО ИЯИ РАН выполнен совместный эксперимент BEST с высокоинтенсивным искусственным К-захватным источником нейтрино ^{51}Cr активностью $3,41 \pm 0,02$ МКи [2, 3]. Полученный в эксперименте BEST результат согласуется с результатами предыдущих калибровочных галлиевых экспериментов и подтверждает галлиевую аномалию на уровне более 4 стандартных отклонений. Результаты BEST хорошо согласуются с гипотезой о существовании переходов электронных нейтрино в стерильные состояния, но не могут исключить возможного существования другой физики. Для исследования этой неопределенности, необходимо выполнение нового эксперимента BEST-2 с К-захватным источником ^{58}Co , излучающим монохроматические нейтрино с энергией в 2 раза выше, чем в источнике ^{51}Cr , что позволит также исследовать зависимость галлиевой аномалии от энергии нейтрино. Планируемые исследования по поиску переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на коротких расстояниях можно реализовать только на галлиевой мишени Галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО ИЯИ РАН. Результат может быть применен для поиска физических явлений за

пределами Стандартной модели физики частиц, в том числе кандидатов на роль темной материи.

6. Задача «Создание прототипов Большого баксанского нейтринного телескопа (ББНТ) и проведение физических измерений на прототипах ББНТ»

Для регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий необходимы установки с гигантской экспозицией. Только таким способом можно получить информацию о наиболее энергичных процессах, идущих во Вселенной, в том числе в активных ядрах галактик, остатках сверхновых, крупномасштабных ударных волнах.

В результате создания крупномасштабных нейтринных телескопов открывается новое важнейшее направление в науке – нейтринная астрономия с ожиданием прорывных результатов в этом и смежных направлениях развития фундаментальных исследований.

Проведение долговременных физических измерений на прототипах ББНТ необходимо для дальнейших работ по созданию подземного сцинтилляционного детектора большого объема (ББНТ), направленного на регистрацию солнечных нейтрино CNO цикла, геонейтрино и решения других задач на стыке физики частиц, астрофизики и геофизики.

7. Задача «Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле»

Гидридная модель Земли (или модель богатой водородом Земли) предсказывает большое содержание калия (до нескольких процентов от массы Земли) в Земле. Калий содержит долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K , при распаде которого в основном рождаются гео-антинейтрино и в редких случаях гео-нейтрино (будем обозначать их как $^{40}\text{K-geo-}\bar{\nu}$). Эти $^{40}\text{K-geo-}\bar{\nu}$ могут рассеиваться на электронах и давать вклад в скорость счёта одиночных событий в детекторе Борексино. Основной целью работы в 2025 году является осмысление результатов независимого анализа последних данных Борексино, с включением в анализ не только событий от рассеяния $^{40}\text{K-geo-}\bar{\nu}$ на электронах сцинтиллятора, но и от реакторных антинейтрино, и от антинейтрино, рождённых в распадах урана и тория в теле Земли.

Также в 2025 году в ИЯИ РАН проведено численное моделирование эксперимента Борексино при условии заранее заданного устройства Природы. Моделирование подтвердило результат, полученный ранее о наличии калия в Земле в количестве нескольких процентов от массы Земли.

Дана интерпретация связи изменения климата и укорочение длительности земных суток.

8. Задача «Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций»

Многочисленные факты регистрации гравитационно-волновых (ГВ) всплесков от сливающихся двойных релятивистских звезд позволяют говорить о фактическом возникновении нового ГВ канала астрофизической информации. Они также прогнозируют эффективность многоканальной астрономии, т.е. стратегии параллельного наблюдения на детекторах разной физической природы. В России единственным ГВ детектором в килогерцевом диапазоне частот является комбинированная оптоакустическая антенна ОГРАН, созданная совместными усилиями РАН и МГУ. В паре с нейтринным телескопом БПСТ эта установка позволяет осуществлять двухканальный поиск коллапсаров в нашей Галактике. Это – редкие явления со средним темпом 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.

На текущем этапе развития гравитационно-волновой астрономии внимание привлечено к интерферометрам комбинированного типа, сочетающим майкельсоновские интерферометры с ФП-эталоном и кольцевыми интерферометрами типа Гироскопа Саньяка (ГС). Последний инструмент представляет грави-инерциальный датчик вращательных и наклонных возмущений платформы, на которой он установлен. При использовании зеркал высоких технологий (с рекордной рефлексивностью и исчезающе малыми потерями) он превращается в уникальный прецизионный инструмент для фундаментальных и прикладных задач астрофизики и гравитации. В этой связи коллектив, создавший детектор ОГРАН, обладает серьезной базой, для освоения техники комбинированных интерферометров, в подземных условиях БНО.

9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторе LVD (Гран Сассо, LNGS)»

Все астрономическое научное сообщество ждет коллапса сверхновой звезды на достаточно близком расстоянии для регистрации потока нейтрино. Частота таких коллапсов по современным экспериментальным результатам в спиральных галактиках должна быть один раз в ~30–50 лет. Со времени предыдущей вспышки Сверхновой в нашей

галактике прошло уже более 300 лет, а Сверхновая SN1987A вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке, т.е. за пределами нашей галактики, 23 февраля 1987 года.

Изучение нейтрино от вспышек сверхновых звезд является крайне актуальным и важным направлением современной астрофизики, поскольку нейтрино несут уникальную информацию о внутренних процессах коллапса звезды и взрыва сверхновой.

Нейтрино появляются задолго до видимой оптической вспышки и дают возможность наблюдать события в недоступных другим методам условиях, таких как температура, плотность и динамика коллапсирующего ядра. Наблюдения нейтринных сигналов позволяют верифицировать модели коллапса, понять нейтринную физику и механизм термоядерного нуклеосинтеза, а также проверить фундаментальные свойства нейтрино, такие как иерархия масс и углы смешивания, что важно для расширения физики за пределами Стандартной модели.

10. Задача «Поиск совпадений нейтринных событий LVD (Гран Сассо, LNGS) с событиями от астрофизических источников»

Многоканальное исследование астрофизических объектов включает одновременное использование разных типов детекторов и наблюдений — нейтринных, гравитационно-волновых, оптических и гамма-обсерваторий. Такой подход позволяет получить комплексные данные о событиях высокой энергии во Вселенной, включая вспышки сверхновых, гамма-всплески и слияния компактных объектов. Многоканальные наблюдения обеспечивают более точное и быстрое обнаружение источников, позволяют изучать спектры космических лучей и динамику переменных объектов, а также усиливают оперативность и эффективность научных исследований, объединяя усилия различных научных групп по всему миру.

К поиску совпадений в различных каналах наблюдения астрофизических сигналов подтолкнула регистрация сигналов от слияния двух нейтронных звезд GW170817. Сам гравитационно-волновой сигнал был зафиксированный тремя детекторами в сети LIGO-Virgo. Это событие стало первым прямым сигналом слияния двух нейтронных звезд и позволило определить параметры системы, включая массу (от 2,7 до 3,3 масс Солнца) и расстояние до источника (приблизительно 130 млн световых лет). Затем был короткий гамма-всплеск (GRB 170817A), произошедший через 1,74 секунды после максимума гравитационного сигнала. Этот гамма-всплеск был зарегистрирован космическими обсерваториями Fermi и INTEGRAL и подтвердил широкий сценарий слияния нейтронных звезд как источника коротких гамма-всплесков. Было зарегистрировано электромагнитное излучение в различных диапазонах спектра, включая рентгеновское, ультрафиолетовое,

оптическое, инфракрасное и радиоволновое излучение. Оптические телескопы обнаружили новую светящуюся точку в галактике NGC 4993, что подтвердило локализацию источника и характер события. В наблюдениях участвовали около 70 обсерваторий по всему миру. Рентгеновское послесвечение килоновой вспышки, связанное с последствиями слияния, включая выброс тяжелых элементов (золото, уран, платина), которые считаются главными источниками таких элементов во Вселенной.

Многоканальные исследования астрофизических источников являются ключевыми направлениями для глубокого понимания процессов во Вселенной, открытия новой физики и развития научных технологий в астрономии и физике элементарных частиц.

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

Исследование космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий и поиск их астрофизических источников (ПэВатронов) остаются одной из ключевых задач современной астрофизики, необходимой для решения проблемы происхождения КЛ, открытых более века назад. Для этого требуется комплексный подход, включающий измерение энергетического спектра и массового состава КЛ, а также детектирование гамма-квантов высоких энергий, которые, не отклоняясь магнитными полями, указывают на места ускорения частиц.

Эффективным инструментом для решения этих задач является гибридный метод, который реализуется в эксперименте TAIGA. Он сочетает регистрацию черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) как широкоугольными детекторами, так и узкоугольными атмосферными черенковскими телескопами, а также детектирование мюонной и электрон-фотонной компонент ШАЛ сцинтилляционными установками. Такой подход позволяет одновременно изучать гамма-излучение от точечных источников и диффузные космические лучи в широком диапазоне энергий. На сцинтилляционных установках TAIGA-GRANDE и TAIGA-Muon получены ограничения на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий. Продолжены работы по расширению установок.

Беспрецедентные успехи в этой области достигнуты в эксперименте LHAASO, установки которого (Km2A, WCDA, ENDA). Благодаря рекордной светосиле этих установок и уникальному угловому разрешению были получены научные результаты, опережающие все мировые аналоги. Были открыты новые источники космических гамма-квантов вплоть до энергий $\sim 2,5$ ПэВ в нашей Галактике, были измерены их энергетические

спектры. Было показано, что в некоторых источниках работают ПэВатроны как лептонного, так и адронного происхождения. В отчетном году были получены новые результаты LHAASO по поиску астрофизических источников гамма-излучения при энергиях выше 100 ТэВ.

12. Задача «Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO»

Целью этих работ является исследование потоков гамма-квантов как диффузного потока, так и потоков от известных астрофизических объектов, измерение их энергетических спектров и потоков. Ведется поиск новых источников тремя установками LHAASO: Km²A, водным черенковским детектором WCDA и имиджевыми черенковскими телескопами WFCDA. Эти установки имеют рекордные светосилу и угловое разрешение, превышающие мировой уровень, что позволяет получать выдающиеся результаты. После анализа данных были получены и впервые опубликованы следующие новые результаты: параметры гамма-излучения от некоторых известных ранее и обнаруженных LHAASO новых астрофизических источников и диффузного гамма-излучения. В отчетном году было опубликовано 6 статей по этой теме в высокорейтинговых журналах: по измерению гамма-излучения источников LS I +61° 303, 1LHAASOJ1740+0948u, Cassiopeia A и др.

13. Задача «Поиск солнечных аксионов с помощью пропорциональных счетчиков»

Экспериментальный поиск аксиона необходим для ответа на вопрос об адекватности моделей сильных взаимодействий, основанных на предположении о дополнительной U(1) симметрии. Важным аргументом, стимулирующим поиск аксиона, является то, что аксион и подобные ему частицы рассматриваются как кандидаты на роль частиц темной материи [4] – [6]. Таким образом, поиск аксионов является одной из важных задач в области астрофизики и физики элементарных частиц.

Согласно теоретическим моделям одним из наиболее мощных источников предполагаемого аксиона (адронного аксиона) должно быть Солнце, где излучение аксиона происходит в результате снятия термического возбуждения ядер некоторых элементов в недрах Солнца. Расчеты показывают, что наибольший поток аксионов следует ожидать при M1-переходах в ядрах Fe-57 [7]. Энергия аксиона, возникающего в результате такого перехода, составляет 14,4 кэВ. На Земле аксионы могут быть обнаружены в обратной реакции резонансного поглощения ядрами мишени, содержащими изотоп Fe-57. До настоящего времени аксион не обнаружен. Лучшие на сегодняшний день верхние пределы

на константу связи аксионов с нуклонами в области масс аксионов выше 1 эВ, полученные в экспериментах: $|g_{3AN} - 1,19 \cdot g_{0AN}| \leq 7 \cdot 10^{-6}$ в эксперименте с мишенью из Fe-57 и $|g_{3AN} - g_{0AN}| \leq 8,3 \cdot 10^{-7}$ в эксперименте с мишенью из Kr-83 [8, 9]. Поиски аксионов различными научными группами и международными коллаборациями продолжаются.

Целью данной работы является поиск аксионов с энергией 14,4 кэВ, излучаемых в недрах Солнца, с помощью нового пропорционального счетчика с катодом из АРМКО-железа.

14. Запуск в работу установки «Ковер-3», обеспечение работоспособности установки, проведение набора информации по регистрации кандидатов в фотонные ливни сверхвысокой энергии, поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических источников»

Гамма-астрономия сверхвысоких энергий ($E_\gamma > 100$ ТэВ) является уникальным инструментом для изучения редких астрофизических процессов, происхождения космического излучения и поиска новой физики. Поэтому развитие современных установок для регистрации ШАЛ, таких как «Ковер-3», является актуальной задачей для выполнения широкого спектра исследований в области современной астрофизики. В рамках решения которой выполняется ее постепенное расширение, непрерывное обслуживание и обеспечение стабильного набора данных, для решения актуальных задач современной астрофизики.

15. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO и Telescope Array»

В эксперименте TAIGA на установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE получены результаты измерений массового состава и энергетического спектра космических лучей в диапазоне энергий $\sim 10^{14}$ – 10^{18} эВ, которые хорошо согласуются в области низких энергий с прямыми измерениями, проведенными на спутниках и баллонах, а при высоких энергиях данные установки Tunka-133 хорошо согласуются с результатами экспериментов HAWC, ICE-TOPO, PAO (Pierre Auger Observatory) и TA (Telescope Array).

В рамках обсерватории LHAASO для решения этой задачи используется установка Km2A, площадью более 1 кв. км. Кроме того, в 2024 г. была создана установка ENDA-64, состоящая из 4 кластеров по 16 электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторы), разработанных в ИЯИ РАН и способных регистрировать две главные компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ). Прототип установки (ENDA-INR) работает в Москве на территории ИЯИ РАН. Проводится сравнение данных, получаемых единым методом при

существенно различной высоте наблюдения, а также проводятся работы по изучению влияния метеопараметров на показания детекторов. В 2025 г. установкой Km2A, путем выделения ливней от протонов, был измерен энергетический спектр протонов космических лучей при энергиях 0,2-10 ПэВ, изучалась анизотропия космических лучей сверхвысоких энергий и проводился поиск их возможных источников.

Кроме того, появились первые результаты исследований на установке ENDA-64, имеющие целью измерение спектра и массового состава космических лучей в диапазоне 1-30 ПэВ по адронной компоненте ШАЛ.

Проблема происхождения ультравысокоэнергичных космических нейтрино является одной из актуальных в астрофизике частиц. В феврале 2023 года эксперимент KM3NeT зарегистрировал нейтрино KM3-230213A с рекордной энергией ~ 220 ПэВ. Регистрация этого события плохо согласуется с верхними пределами на поток нейтрино, установленными другими крупными экспериментами (IceCube, Pierre Auger, Baikal-GVD). Одним из возможных объяснений является космогенное происхождение нейтрино – рождение в результате взаимодействия космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) с фотонами реликтового излучения. В работе [10] была исследована согласованность этого сценария с моделями потока космических лучей, построенными по данным эксперимента Telescope Array (TA), в которых преобладают лёгкие ядра.

16. Задача «Усовершенствование модели FANSY 2.0/2D с компланарной генерацией частиц в 2D пространстве во взаимодействиях протонов ПКИ при энергиях выше 1 ПэВ»

Эксперименты на БАК дают информацию, в основном, по характеристикам центральной кинематической области ($\eta \lesssim 4$), играющей второстепенную роль в развитии широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере от частиц первичного космического излучения (ПКИ) (хотя и дающей важный вклад в генерацию мюонов). Только эксперимент LHCf даёт немного данных о характеристиках нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F , но узких интервалов по поперечному импульсу p_T . Данные по взаимодействиям пионов и каонов, играющих существенную роль в развитии ШАЛ, ещё более скудные. Поэтому до сих пор существует несколько конкурирующих моделей адрон-ядерных взаимодействий, применяемых для моделирования ШАЛ. С другой стороны, эти модели, в основном, воспроизводят генерацию только основных типов стабильных адронов. В частности, рождение чармированных адронов моделируется только в SIBYLL. Достаточно редко в этих моделях принимается во внимание рождение мезонных резонансов, которые

дают определённый вклад как в корреляции частиц, так и в прямую генерацию мюонов, являющихся важной компонентой ШАЛ.

Наконец, по-прежнему остаётся актуальной проблема более детальной разработки моделей генерации вторичных частиц в фрагментационной области ($x_F \gtrsim 0,01$) при сверхвысоких энергиях. В частности, это необходимо для изучения развития ШАЛ с учетом т.н. компланарности (ярко выраженной азимутальной асимметрии поперечных импульсов) наиболее энергичных вторичных частиц (ЭВЧ), обнаруженной в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами при энергиях $E_0 \gtrsim 10^{16}$ эВ

С этой целью продолжалась юстировка, уточнение и отладка программного пакета FANSY 2.0, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов при E_0 от $\sim 10^{11}$ до $\sim 10^{20}$ эВ, как в рамках традиционных представлений (FANSY 2.0 QGSJ), так и с учетом компланарной генерации адронов (FANSY 2.0 CPG). В частности, для решения задачи №2 были уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных частиц для различных феноменологических моделей и введена возможность её розыгрыша в рамках гипотезы о связи компланарности с переходом от трехмерного к двумерному пространству.

17. Задача «Моделирование развития стволов ШАЛ от частиц ПКИ на основе пакетов FANSY 2.0 и CORSIKA»

Основную роль в развитии ШАЛ от частиц ПКИ играют частицы из т.н. фрагментационной области. Но эксперименты на БАК получают данные, в основном, по характеристикам центральной кинематической области взаимодействий адронов. Только эксперимент LHCf даёт некоторую информацию о характеристиках нейтральных частиц в области больших x_F . Экспериментальные данные по взаимодействиям мезонов, которые также играют существенную роль в развитии ШАЛ, получены при низких энергиях.

В экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК) в космических лучах была обнаружена [11] – [14] тенденция к компланарности подстволов с энергией $E \gtrsim n \cdot 10$ ТэВ в центральных стволах ШАЛ, интерпретированная как результат компланарной генерации частиц (КГЧ) именно во фрагментационной области [15].

Поскольку прямые исследования во фрагментационной области в настоящее время возможны только в космических лучах, цель работы – изучение возможного влияния КГЧ на азимутальные корреляции характеристики частиц в так называемых гамма-адронных семействах, т.е. групп наиболее энергичных ($E \gtrsim 10$ ТэВ) частиц в стволах ШАЛ.

Идеи, объясняющие это явление, разделяются на две принципиально разные группы: 1) традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий [16] – [19]; 2) гипотеза,

постулирующая переход размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях от трех к двум измерениям ($3D \leftrightarrow 2D$) [20].

18. Задача «Исследование азимутальных характеристик наиболее энергичных потоков в стволах ШАЛ»

Наземные эксперименты в космических лучах при энергиях выше 10^{15} эВ неразрывно связаны с моделированием развития ядерно-электромагнитных каскадов в атмосфере (т.н. широкие атмосферные ливни, сокращенно ШАЛ). Результаты наземных измерений любых компонент ШАЛ (гамма-кванты, электроны/позитроны, различные адроны, мюоны) сравниваются с результатами моделирования.

Развитие ШАЛ в атмосфере определяется множеством случайных процессов, от пробегов до взаимодействия до сильно флуктуирующих характеристик взаимодействия и генерации вторичных частиц. В результате наложения этих эффектов могут возникать случайные конфигурации траекторий прихода частиц на поверхность детекторов, имитирующие азимутальные эффекты. Поэтому необходимо в первую очередь разобраться с этой проблемой.

Много лет основной рабочей программой моделирования ШАЛ является пакет программ CORSIKA, включающий несколько конкурирующих моделей адронных взаимодействий. В 2024–2025 гг. для анализа вклада случайных флуктуаций в эффекты компланарности были проведены расчеты развития ШАЛ [21], инициированных протонами первичного космического излучения (ПКИ) с энергиями $E_0 > 2$ ПэВ, в рамках пакетов FANSY 2.0/QGSJ. Дополнительно начаты аналогичные расчеты по пакету CORSIKA (модели QGSJETII-04 и SIBYLL 2.3E) для трех значений высот в атмосфере применительно к проводившимся экспериментам с рентгеноэмульсионными камерами (РЭК).

19. Задача «Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации нейтринных вспышек от взрывов сверхновых звёзд с коллапсом ядра, мониторингирование потоков нейтрино от коллапсирующих звезд и поиск редких нейтринных событий от Галактических источников»

Звёзды с массами более 8 солнечных масс в конце своей жизни испытывают гравитационный коллапс ядра. Этот процесс сопровождается излучением нейтринного потока и приводит к яркому свечению, известному как сверхновая. Регистрация коллапсных нейтрино имеет важное значение, так как эти частицы несут информацию о физических условиях в ядрах погибающих звёзд. Нейтринные детекторы помогают астрономам зафиксировать оптическое свечение сверхновых, так как между нейтринной вспышкой и оптическим свечением проходит несколько часов. Современные оценки

предполагают, что ожидаемая частота коллапсов, как видимых, так и скрытых, в реально доступной для наблюдения области Вселенной составляет от 1 до 3 раз в столетие. На сегодняшний день зарегистрирован единственный нейтринный сигнал от вспышки сверхновой – SN 1987A, произошедшей в Большом Магеллановом Облаке 23 февраля 1987 года. Нейтринный сигнал был зафиксирован детекторами:

- LSD (СССР-Италия),
- КП (Япония),
- IMB (США),
- БПСТ (СССР).

Интерпретация этих данных до сих пор не дала однозначного результата. Однако благодаря полученным данным удалось установить ограничения на массу электронных антинейтрино, изучить их время жизни, магнитный момент и число ароматов нейтрино.

Для регистрации нейтринного сигнала от вспышки сверхновой с коллапсом ядра с хорошей статистической точностью требуется непрерывная работа крупных многоканальных детекторов в течение десятков лет. Высокая статистическая точность результатов обеспечит получение детальной информации о потоках нейтрино, динамике взрыва (коллапса) и свойствах излучаемых нейтрино.

БПСТ устанавливает лучший предел на частоту коллапсов в нашей галактике и её окрестностях, а также обладает самым длительным временем наблюдения за галактикой. Эксперимент по поиску нейтринных всплесков от взрывов сверхновых с коллапсом ядра на БПСТ ведётся с 30 июня 1980 года.

В течение 2025 года проводились следующие работы:

- поддержание установки в рабочем состоянии;
- обеспечение режима непрерывного набора информации;
- создан архив экспериментальных данных БПСТ за 2025 год.

На основе экспериментальных данных БПСТ:

- проведен поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звёзд;
- получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра в нашей галактике и её окрестностях;
- изучены источники фона при поиске вспышек от взрывов сверхновых.

20. Задача «Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией

1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино»

Мюоны, пересекающие БПСТ в направлении снизу вверх, выделяются из общего потока время-пролетным методом. Такие мюоны могут быть рождены только мюонными нейтрино и антинейтрино из нижней полусферы. БПСТ позволяет определить направление прихода мюонов, пересекающих установку, поэтому можно с известной точностью определять направление прихода породивших их мюонных нейтрино. Направления прихода мюонных нейтрино можно сопоставлять с координатами различных астрофизических транзиентов. В качестве потенциальных источников нейтрино рассматриваются известные астрофизические объекты: активные ядра галактик, остатки сверхновых, источники гамма-всплесков, а также, так называемые "скрытые источники" нейтрино [22] – [25].

На БПСТ эксперимент по регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино ведётся с 1978 года. В течение 2025 года установка поддерживалась в работоспособном состоянии. Обеспечивался непрерывный набор информации. Создан архив экспериментальных данных БПСТ за 2025 год.

21. Задача «Результаты исследования корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов»

На установке Ковер БНО ИЯИ РАН детально исследовались вариации потока мюонов космических лучей во время гроз [26]. Было показано, что изучение этих данных в сочетании с другими наблюдениями является мощным инструментом для анализа геофизических процессов и даже открытия новых эффектов [27]. В работе [28] описан метод, позволяющий оценивать распределение электрического поля в атмосфере по мюонным данным. Оказалось, что поле порядка грозового может в некоторых случаях наблюдаться при хорошей погоде. В работах [29, 30] представлены данные о наиболее интересном событии этого типа, имевшем место 1-2 сентября 2019 г. В районе Малого Кавказа в этот период другой комплексной установкой на горе «Арагац» в Армении наблюдалась грозная активность, эпизодически сопровождаемая регистрацией на земле, на высоте гор, гамма – излучения и восходящих компактных светящихся образований.

Характерные особенности данных, полученных на Баксане: завышенное значение приземного поля «хорошей погоды», локальное возмущение геомагнитного поля, сейсмические возмущения, а также, возмущения полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС). Возможная причина возникновения таких возмущений - сейсмогенное электрическое поле в атмосфере, появление которого является одним из основных

предвестников землетрясений [31] – [33]. На то, что оно может быть причиной возмущений, регистрируемых установкой, указывает её географическое расположение в сейсмоопасном районе Центрального Кавказа (43.3 N, 42.7 E), месте коллизии литосферных плит - Аравийской и Евразийской, в 20 км от Пшекиш – Тырнаузской шовной зоны и вулкана Эльбрус. Выделение энергии столкновения плит может проявляться не только в виде землетрясений, но и в виде плавных деформаций литосферы. При этом, механизмы генерации сейсмогенного поля известны, хотя вопрос происхождения и распределения в атмосфере сейсмогенного электрического поля не является до конца решённым. В работе [34] описывается стандартный электрокинетический способ его генерации движением флюидов по трещинам в коре земли, в [35] – альтернативный способ разделения заряда в горных породах под действием градиента механического напряжения с последующим транспортом положительного заряда к поверхности за счёт активизации дырочной проводимости. В [36] анализируется способность участия сейсмогенного поля в формировании ионосферных явлений, предшествующих землетрясениям. Отмечается, что гипотеза о значимом влиянии восходящей аэрозольной конвекции, переносящей сейсмогенный заряд в верхние слои атмосферы, выступая причиной ионосферных аномалий, кажется нереалистичной. По оценкам авторов, ослабление электрического поля с высотой вызвано увеличением проводимости атмосферы и горизонтальным распространением тока. Чтобы объяснить возникновение значительных ионосферных аномалий, необходимо предположить наличие в нижних слоях атмосферы слишком больших токов и электрических полей, которые никогда не наблюдались в периоды без гроз.

Энергетику процесса определяет выход флюидов вследствие погружения в астеносферу и плавления более плотных масс коры. Согласно стандартному механизму генерации поля, описанному на стр. 71 -72 в [34], флюиды, проникая сквозь кору на поверхность земли, поставляют положительный заряд электрокинетическим способом. Электродвижущая сила определяется перепадом давления, избыточного над гидростатическим, на входе флюидов в трещины породы и выхода оттуда, то есть, от уровня подошвы коры. На Кавказе реализован исключительный случай. Вследствие столкновения континентов и полного закрытия океана Тетис, ранее разъединявшего их, случилось так, что пластичная порода литосферной мантии под корой практически вся заместила астеносферой. В работе [37] демонстрируется распределение астеносферы под Кавказским регионом. Там же, отмечается и расположение возможного остатка коры океана Тетис. В результате, выходящие из астеносферы флюиды, сразу попадают в трещины коры,

сконцентрированные в шовных зонах тектонических структур Кавказа, ранее бывших островами в океане. Там, где выход на поверхность интенсивный – развиваются сейсмические грозы. Их особенность в том, что они получают энергию для конвекции за счёт конденсации паров воды, выходящей с флюидами. Вместе с парами, поднимается до границы тропосферы, и выше, до ионосферы, положительный заряд, формируя сторонний ток. Процесс перемещения рассмотрен во многих работах [38] – [44].

Для события в период 01-02.09.2019 (опубликовано в [29, 30]) проведён анализ соответствия наблюдений сейсмическому механизму.

1. Увеличение эффективного объема глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD

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

Цель исследования – создание и эксплуатация нейтринного телескопа масштаба кубического километра в озере Байкал для поиска и исследований потоков астрофизических нейтрино высоких энергий.

1.1. Методология выполнения исследования

В 2025 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, комплектацию и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовку инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировку конструктивных элементов и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания систем телескопа, монтаж новых кластеров телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах, прокладку донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

1.2. Результаты исследований

В течение 2025 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня собственного свечения водной среды и временного поведения параметров оптических модулей и других функциональных систем установки. Проведены долговременные измерения относительного смещения фотодетекторов установки с помощью гидроакустической системы позиционирования. Выполнена оценка положений

фотодетекторов на основе данных инерциальных датчиков, расположенных в оптических модулях, с использованием физической модели гирлянды.

В результате проведенных исследований и работ были получены следующие основные результаты:

- проведено полное тестирование системы регистрации новых гирлянд кластера 14 в процессе их монтажа со льда оз. Байкал. Кластер 14 телескопа был включен в режиме постоянного набора данных в апреле 2025 г.

- Обеспечено изготовление и проведена настройка в составе телескопа глубоководных калибровочных источников света на основе лазеров и матриц светодиодов. Кластер 14 оснащен двумя лазерными калибровочными источниками и 12-ю матрицами светодиодов.

- В рамках совместных работ по проекту HUNT (Китай - Россия) разработана система подключения прототипа гирлянды из 24-х оптических модулей с фотоэлектронными умножителями диаметром 20 дюймов к системе сбора данных оптоволоконного кластера Baikal-GVD и обеспечен монтаж гирлянды со льда озера. Прототип гирлянды включен в режиме постоянной экспозиции в апреле 2025 г.

- Во время зимней экспедиции (февраль – апрель 2025 г.) проведены профилактические работы на 5-ти гирляндах телескопа, для чего был произведен их частичный демонтаж.

- Смонтированы и испытаны в лабораторных условиях блоки электроники системы управления и сбора данных для двух кластеров телескопа, 15-го и 16-го, монтаж которых запланирован на 2026 год. Блоки электроники установлены в глубоководные корпуса и подготовлены к транспортировке на оз. Байкал.

- Обеспечена комплектация и изготовление глубоководных кабельных коммуникаций для двух кластеров, монтаж которых запланирован на 2026 год.

- Во время летней экспедиции на оз. Байкал проведены профилактические работы и подготовлено ледорезное оборудование и система развертывания телескопа для экспедиции 2026 г.

С вводом в эксплуатацию в апреле 2025 года 8 новых гирлянд оптических модулей рабочий объем Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил значение $\approx 0,7 \text{ км}^3$ в задаче регистрации событий от нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ. На данный момент телескоп состоит из 14 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (более 4200 оптических модулей) и сохраняет позицию крупнейшего нейтринного телескопа Северного полушария.

Результаты выполненных в рамках Задачи 1 вошли в перечень важнейших результатов ИЯИ РАН за 2025 год.

1.3. Применение и значимость результатов исследования

В результате выполненных в 2025 году работ детектирующий объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино вырос до $\sim 0,7$ кубического километра, что обеспечило регистрацию нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Создание крупнейшего в Северном полушарии нейтринного телескопа с объемом порядка кубического километра, безусловно, результат уровня мировых достижений. Большую значимость имеет пополнение базы экспериментальных данных по регистрации сигналов и выявления событий, вызванных нейтрино высокой энергии, за 2024 - 2025 годы. Совершенствование систем управления телескопом и обработки данных на современном уровне облегчит доступ к проведению широкого круга исследований в области астрофизики и астрономии, включая исследования гидрологических, оптических и гидроакустических свойств водной среды озера Байкал.

2. Непрерывный набор, сохранение и анализ экспериментальных данных

Предметом исследования является массив накопленных экспериментальных данных.

Цель исследования заключается в восстановлении физических характеристик зарегистрированных событий, а также организации потоковой обработки и набора экспериментальных данных.

2.1. Методология выполнения исследования

Накопление экспериментальных данных выполняется автоматизированной береговой системой управления телескопом. Набор данных на каждом кластере телескопа разделён на сеансы. Сеансы могут быть калибровочными, техническими или мюонными. Штатный набор данных выполняется во время мюонных сеансов. Средняя продолжительность мюонных сеансов составляет 12 часов. Темп счёта триггерной системы кластера во время мюонного сеанса составляет десятки герц, в зависимости от уровня люминесценции наблюдаемой среды. После установки 14 кластера зимой 2025 года, объём данных, набираемых Baikal-GVD, составил, в среднем, 500 Гб в сутки.

Набранные данные сохраняются на береговом файловом хранилище, а также передаются на серверы ЛИТ ОИЯИ для дальнейшей потоковой обработки. Обработка экспериментальных данных осуществляется в трех режимах: пофайловая обработка, порановая и оффлайн обработка. В процессе пофайловой обработки события с телескопа обрабатываются с минимальной задержкой до десяти минут, с использованием предварительных калибровок и данных позиционирования каналов и упрощенной реконструкции, и используются для выделения ярких нейтринных событий для идентификации уникальных транзиентов, требующих скоординированного наблюдения другими телескопами в режиме реального времени. В 2025 м году были оптимизированы параметры трековой реконструкции и критерии отбора ярких событий в трековом канале для пофайловой обработки. В процессе порановой обработки восстановление также осуществляется с предварительными калибровками и геометрией, но со стандартным алгоритмом реконструкции, типичная задержка обработанных данных составляет масштаба 24 часов. Результаты порановой обработки в основном используются для быстрого анализа алертных событий с других телескопов. Основным инструментом для набора больших банков нейтринных событий является оффлайн обработка с использованием наиболее

точных калибровок и данных позиционирования каналов, а также более ресурсоёмкой реконструкции.

2.2. Результаты исследований

В настоящее время, общий объём накопленных экспериментальных составляет 280 ТБ. Системы потоковой обработки в порановом и пофайлов режиме функционируют на основе облачной инфраструктуры ЛИТ ОИЯИ.

В 2025 году был набран банк нейтринных событий в трековом канале по результатам оффлайн-обработки 5-летнего набора данных, набранных в 2019-2024 годах. Общее время наблюдений в пересчете на один кластер телескопа составило около 30 лет. В 2025 м году был набран банк из около 2000 событий. Для создания банка была разработана методика выделения событий-кандидатов в нейтрино с помощью классификатора на основе машинного обучения – бустированных деревьев принятия решений. Было использовано два классификатора – один оптимизирован для нейтрино низких энергий, другой для нейтрино высоких энергий. Основное назначение классификаторов – подавить неправильно восстановленные как восходящие треки события от групп атмосферных мюонов. Классификаторы обучались на двух наборах фоновых событий – неправильно восстановленных группах атмосферных мюонов с естественным спектром и с лидирующим мюоном с энергией выше 100 ТэВ, и наборах сигнальных событий – восходящих нейтрино с атмосферным спектром и нейтрино с жестким астрофизическим спектром. Для критерия отбора по значению классификаторов: значение хотя бы одного из них более 0,25, загрязнение набора событий фоном от неправильно восстановленных атмосферных мюонов составило 3%. Угловое разрешение восстановления направления мюонов для выделенных событий зависит от длины трека и позволяет оценить направление частицы с ошибкой меньше 0,5 градуса для треков с длиной более 300 м. Для оценки энергии мюонов в 2025 году была разработана методика на основе удельных потерь энергии мюона. Энергетическое разрешение для мюонов с энергиями от 10 ТэВ составило фактор 2,5. Энергетический спектр полученных событий насыщен низкими энергиями масштаба 1 ТэВ и менее, в наборе присутствует около 40 событий с восстановленной энергией мюонов более 45 ТэВ, максимальная восстановленная энергия мюона составляет около 1,2 ПэВ. Полученный набор событий позволяет изучать спектр атмосферных нейтрино и вести поиск астрофизического потока нейтрино в трековом канале.

2.3. Применение и значимость результатов исследований

Для нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба задача организации непрерывного набора, потоковой обработки и долговременного хранения данных является

ключевым условием реализации его научного потенциала. Развитая в 2025 году система пофайловой, порановой и оффлайн-обработки обеспечивает как оперативное восстановление характеристик событий с задержкой не более 10 минут, так и формирование репрезентативных выборок для последующего детального физического анализа. Сокращение времени между регистрацией события и получением его реконструированных параметров позволяет телескопу Baikal-GVD полноценно участвовать в программах многоканальной астрономии, оперативно реагировать на внешние алерты и формировать собственные оповещения.

Сформированный в 2025 году банк нейтринных событий в трековом канале на основе оффлайн-обработки пятилетнего набора данных 2019–2024 годов, является исходной базой для исследования спектра атмосферных нейтрино, поиска астрофизического потока нейтрино и анализа пространственного распределения сигналов. Угловое разрешение лучше 0,5 градусов для длинных треков и разработанная методика оценки энергии мюонов позволяют использовать накопленные данные в задачах по изучению источников нейтрино высоких энергий и сопоставлению результатов Baikal-GVD с данными других нейтринных телескопов.

3. Получение статистически обеспеченного результата в исследовании глобального диффузного потока нейтрино высоких энергий астрофизической природы

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

Цель исследований – выделение из накопленных экспериментальных данных событий, вызванных потоками астрофизических нейтрино высоких энергий, определение направлений их прихода и энергии, сравнение с результатами регистрации космических событий другими нейтринными телескопами.

3.1. Методология выполнения исследования

Методология исследований заключается в анализе и обработке накопленных экспериментальных данных с помощью специальных пакетов программ, позволяющих определять время и место события в детектирующем объеме телескопа, направление прилета частицы и ее энергию. Подготовка и предварительная обработка данных осуществляется автоматически с помощью пакета программ «БАРС».

3.2. Результаты исследований

В 2025 году проведены исследования диффузного потока космогенных нейтрино в области энергий выше 10 ПэВ. При анализе экспериментальных данных использовался банк каскадных событий, накопленных с апреля 2018 года по март 2024 года, соответствующий 9855 дням эффективного набора данных одним кластером телескопа. Условиями отбора интересующих нас событий являлось требование к множественности сработавших оптических модулей (ОМ) в событиях $N_{hit} > 8$ и ограничение снизу восстановленной энергии каскада $E > 10$ ПэВ. В результате анализа данных не были выявлены события, удовлетворяющие условиям отбора. Исходя из этого факта нами получено одно из наиболее строгих на сегодняшний день ограничений на величину потока космогенных нейтрино в области энергий выше 10 ПэВ (рисунок 3.1).

В результате совместного анализа данных экспериментов IceCub, PAO, Baikal-GVD и KM3NeT получена оценка величины потока нейтрино, равновесного по ароматам и со спектром E^{-2} на уровне:

$$E^2 F_{(1-аромат)}^{(\nu+\bar{\nu})} = 7,2_{-5,9}^{+16,5} \cdot 10^{-10} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \quad (3.1)$$

в интервале энергии 72 ПэВ – 2,6 ЕэВ, совпадающем с интервалом неопределенности энергии события КМЗ-230213А.

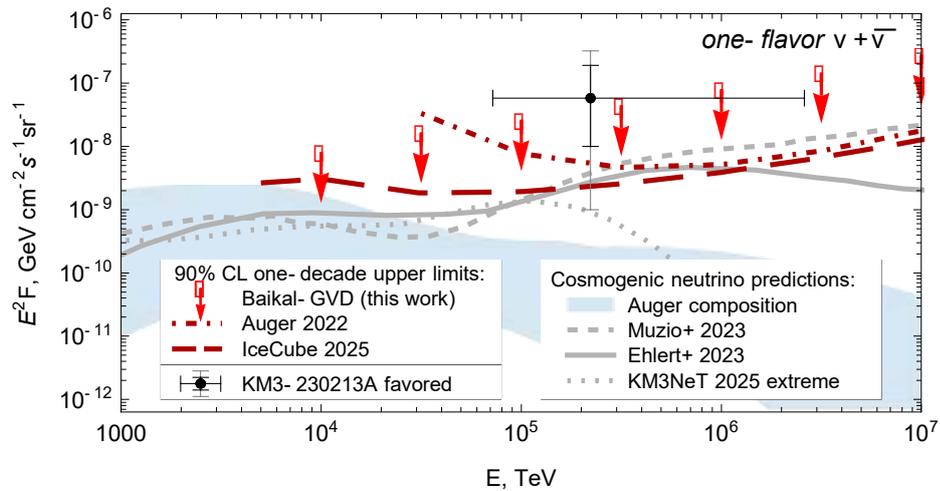


Рисунок 3.1 – Верхние пределы на 90% д.у. на поток космогенных нейтрино по данным Baikal-GVD (красные точки) в сравнении с ограничениями IceCube, PAO, с оценкой потока КМЗ-230213А и с предсказаниями ряда теоретических моделей.

3.3. Применение и значимость результатов исследования

Чувствительность нейтринного телескопа Baikal-GVD, достигнутая к настоящему времени, выводит его в ряд лидирующих экспериментов в исследовании потоков нейтрино космогенного происхождения. Совместный анализ данных нейтринных телескопов IceCube, Baikal-GVD и КМЗНеТ позволит в недалеком будущем проверить предсказания большинства теоретических моделей, описывающих процессы генерации и распространения космических лучей сверхвысоких энергий и их массовый состав.

4. Разработка и внедрение методов долговременного хранения и обеспечения доступа к данным Baikal-GVD

Объектом исследования является распределённая инфраструктура хранения и резервного копирования данных нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Цель исследования – обеспечить надёжное долговременное хранение и автоматическое резервное копирование накапливаемых данных Baikal-GVD, а также удобный доступ к этим данным для систем обработки, мониторинга качества и физических анализов.

4.1. Методология выполнения исследования

Данные, выделяемые триггерной системой телескопа, передаются в ЛИТ ОИЯИ через 100 Мб/с радиоканал, обеспечивающий доступ берегового центра Baikal-GVD к сети Интернет. Копирование выполняется утилитой `rsync`, позволяющей гарантировать корректность полученных данных по контрольным суммам, а также выполнять инкрементальное копирование. Перед передачей данных с берегового центра они сжимаются в `bz2` архивы, что позволяет сократить занимаемый объём в 5 раз. Поскольку доступность радиоканала зависит от погодных условий, накопленные данные также хранятся на файловом хранилище берегового центра. В настоящий момент береговое файловое хранилище поддерживает хранение объёма данных, соответствующего 12 месяцам экспозиции телескопа.

После поступления на серверы ОИЯИ данные телескопа копируются на основное хранилище данных Baikal-GVD: облачное хранилище петабайтового масштаба ЛИТ ОИЯИ под управлением `SephFS`, откуда они становятся доступны для штатной обработки и анализа.

Резервные копии данных телескопа хранятся на двух независимых, географически разнесённых системах. С ноября 2023 года для резервирования используется ленточное хранилище EOS-СТА в ЛИТ ОИЯИ (г. Дубна). С января 2024 года данные также резервируются на хранилище `dpm`, расположенном в ИЯИ РАН (г. Троицк). Репликация данных с `SephFS` на резервные хранилища выполняется автоматически, раз в час.

4.2. Результаты исследований

Результатом выполненной работы является система резервирования и хранения данных телескопа, обеспечивающая доступ и надёжное хранение полученных измерений. Набранные данные хранятся в трёх независимых и географически разнесённых системах:

– `SephFS` ЛИТ ОИЯИ (г. Дубна) – основное хранилище данных. Используется для чтения данных для штатной обработки и физического анализа.

– EOS-СТА ЛИТ ОИЯИ (г. Дубна) – ленточное хранилище. Используется для долговременного хранения данных.

– dpm ИЯИ РАН (г. Троицк) – резервное файловое хранилище, предназначенное для хранения данных на площадке, географически удалённой от г. Дубна.

К концу 2025 года объём набранных данных составляет порядка 280 терабайт.

4.3. Применение и значимость результатов исследований

Созданная система долговременного хранения и резервирования данных обеспечивает поддержание в актуальном состоянии полной копии данных Baikal-GVD, набранных с 2016 года, одновременно в трёх независимых хранилищах. Наличие оперативного облачного хранилища в ЛИТ ОИЯИ, ленточного архива EOS-СТА и географически удалённого дискового хранилища в ИЯИ позволяет, с одной стороны, иметь оперативный доступ к данным, а с другой гарантирует их надёжную сохранность.

Этот результат принципиально важен для будущих астрофизических задач, требующих обработки многолетней экспозиции телескопа, переобработки данных новыми методами, а также для обеспечения воспроизводимости уже полученных результатов.

5. Подготовка установок и систем УНУ ГГНТ к проведению экспериментов с высокоинтенсивными источниками нейтрино и антинейтрино

5.1. Проверка химико-технологических и счетных систем ГГНТ

После завершения эксперимента BEST на ГГНТ выполнялись тесты и проверки с использованием изотопов ^{37}Ar , ^{71}Ge . Для проверки систем и оборудования ГГНТ на остаточную радиоактивность в отчетном периоде было выполнено 3 серии измерений бланк извлечений и фоновых заполнений, в ходе которых было установлено на счет 14 заполненных пропорциональных счетчиков. Бланк извлечения проводились с целью проверки чистоты установок синтеза, системы отдувки, химической посуды и химических реактивов повторного использования. Фоновые измерения проводились с целью проверки счетных характеристик пропорциональных счетчиков (ПС) и счетных систем ГГНТ. ПС с фоновыми заполнениями устанавливались на долговременный счет (от двух до пяти месяцев) для проверки стабильности счетных систем и счетных характеристик счетчиков. В ходе этих измерений счетные системы показали стабильную работу, получены устойчивые параметры калибровок счетчиков (разрешение, положение пика). Полученные оценки фоновых характеристик проверяемых счетчиков остались в пределах неопределенности на прежнем уровне. Результаты анализа бланк извлечений из установки синтеза моногермана показали, что система полностью чиста, отсутствует какое-либо остаточное радиоактивное загрязнение. В измерениях бланк извлечений из малой химии в февральских и апрельских заполнениях обнаружены следы изотопа ^{68}Ge . Для устранения причин загрязнения были приобретены новые химические реактивы (соляная кислота, четыреххлористый углерод, гексан и щелочь), которые использовались в августовских извлечениях, это позволило снизить содержание ^{68}Ge в этих заполнениях в 5 раз, но фон заполнений еще в 10 раз выше нормального, требуются дальнейшие исследования и работы по поиску и устранению данной проблемы. Для дальнейшей очистки планируется полная ревизия реактивов и химической посуды, используемой на стадии процедуры экстракции/реэкстракции образцов. По возможности будет произведена замена посуды и оборудования, подлежащее быстрой замене, будет подвергнуто дополнительной тщательной очистке. Работы по подготовке систем и установок будут продолжены.

5.2. Замена и дооснащение оборудования систем ГГНТ

В течение отчетного периода проводились регламентные работы по ремонту, замене и тестированию оборудования ГГНТ. Для повышения надежности и производительности

система выпарных установок ГГНТ была дооснащена дополнительной парогенераторной установкой ПАР-200НТ-2 с максимальной паропроизводительностью - 200 кг п/ч.

Количество имеющихся в ГГНТ пропорциональных счётчиков недостаточно для независимых измерений при проведении экспериментов с искусственными источниками нейтрино. Изготовление счётчиков – сложный, многоступенчатый и во многом уникальный технологический процесс, требующий высочайшей квалификации исполнителей. Их практически нет во всём мире. В настоящее время найден специалист, готовый взяться за изготовление нового тестового образца. Со специалистом-кварцевудом согласован предварительный договор о сотрудничестве на основании разработанной в лаборатории Технологической инструкции по изготовлению счётчиков (рисунок 5.1).

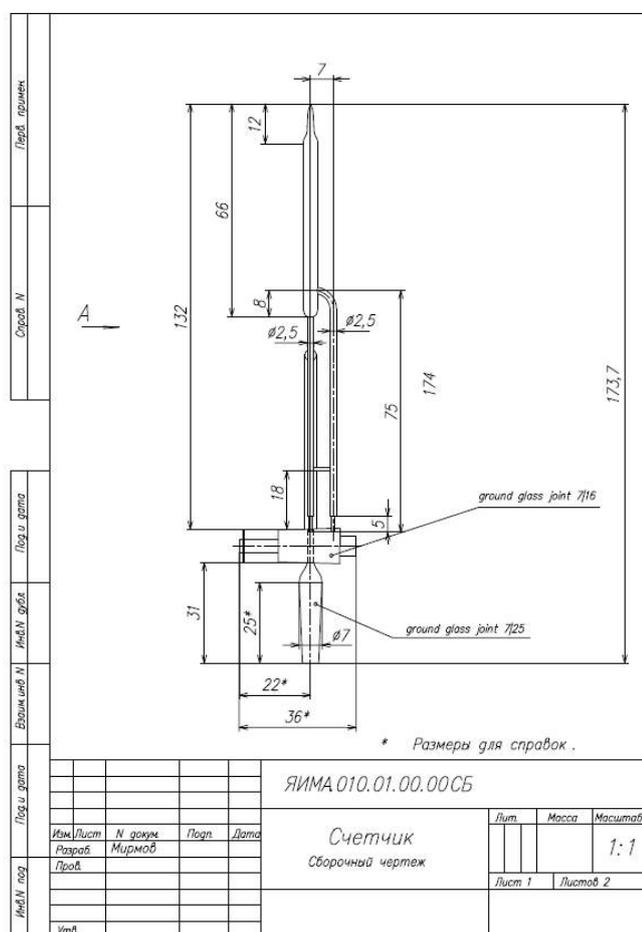


Рисунок 5.1 – Сборочный чертёж пропорционального счётчика

Предполагается, что основная и наиболее ответственная часть работ будет производиться на базе лаборатории РХМДН ОЛВЭНА в ИЯИ. Поскольку счётчики не производились уже более 10 лет, требуется подготовить, дооснастить и модернизировать мастерскую для предстоящих работ, а также приобрести недостающие материалы и

инструменты, после проведения всех перечисленных работ будут начаты работы по изготовлению опытного экземпляра нового пропорционального счётчика.

5.3. Разработка и проведение плана модернизации систем ГГНТ и галлиевой мишени для проведения измерений с источниками

Разработанная научная программа для следующего после BEST эксперимента по измерению скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ предполагает выполнение трех экспериментов с источниками нейтрино и антинейтрино на галлиевой мишени ГГНТ:

- 1) ^{58}Co – источник нейтрино, 400 кКи,
- 2) ^{170}Tm – источник антинейтрино, 2 МКи,
- 3) ^{90}Sr – источник антинейтрино, 80 кКи.

Эксперимент с источником нейтрино ^{58}Co предназначен для решения галлиевой аномалии, который позволит определить параметры осцилляционных переходов в стерильные состояния нейтрино и выявить зависимости галлиевой аномалии от энергии нейтрино.

Эксперименты с источниками антинейтрино направлены на поиск переходов антинейтрино в нейтрино через СРТ-нарушения и через распады нейтрино, эксперимент с источником ^{90}Sr нужен, чтобы определить моду перехода – через СРТ-нарушения и через распады нейтрино. Эксперимент будет в ~ 5 раз менее чувствителен к переходам нейтрино-антинейтрино, поэтому, если в эксперименте с ^{170}Tm положительный сигнал не будет обнаружен, то эксперимент с ^{90}Sr проводиться не будет.

Для проведения экспериментов с антинейтринными источниками не требуется какой-либо значимой модернизации систем и галлиевой мишени ГГНТ. Необходима галлиевая мишень (48 т) с единой зоной. Для этого будет использоваться двухзонная мишень BEST, извлечения из которой будут заполняться в один пропорциональный счётчик. При проведении этих экспериментов нагрузка на счётчики и системы извлечения будет стандартной, не требующей никаких доработок, кроме стабильности и надежности.

С точки зрения радиационной безопасности эксперимент не требует каких-то особых защит. Источник значительно менее опасен, чем источник ^{51}Cr из эксперимента BEST.

Для измерения активности этих источников потребуется изготовление нового калориметра.

Наибольших изменений и затрат требуется для проведения эксперимента с источником нейтрино ^{58}Co . Для него потребуется изменить конфигурацию двухзонного

детектора, разделив внешнюю цилиндрическую зону на две независимые зоны. Для проведения независимых извлечений из трех зон потребуется еще одна независимая система перекачки из этой зоны и независимая система отдувки. Для осуществления синхронной перекачки/закачки металла из трех зон установки необходима новая система автоматизированного управления и контроля. Поскольку в каждом извлечении из трехзонной мишени будут для заполнения задействованы 3 пропорциональных счетчика, потребуется изготовление новых миниатюрных пропорциональных счетчиков с малым собственным фоном, проведение их аттестации и отбор по фоновым и счетным характеристикам.

Для радиационной безопасности потребуется новая более мощная защита источника и персонала при проведении измерений. Тоже относится и к калориметрическим измерениям активности данного источника, потребуется новый калориметр с усиленной защитой, обеспечивающий безопасную работу персонала и оборудования.

Исходя из того, что для антинейтринных источников не потребуется значительной модернизации систем ГГНТ предлагается, следующая последовательность выполнения экспериментов:

- 1) ^{170}Tm .
- 2) ^{90}Sr – будет проводиться только, если в эксперименте с ^{170}Tm будет получен положительный результат.
- 3) ^{58}Co .

5.3.1. Модернизация галлиевой мишени ГГНТ

На данном этапе рассматривались наиболее оптимальные варианты модернизации по преобразованию двухзонной установки в трехзонную.

5.3.1.1. Форма зон мишени в двухзонном эксперименте BEST

Форма зон в галлиевой мишени в эксперименте BEST-2 будет основываться на форме 2-зонной мишени эксперимента BEST. В двухзонной мишени галлий был разделён на 2 зоны с примерно одинаковым пробегом нейтрино от источника в каждой. Внутренняя зона имела сферическую внешнюю границу, а внешняя – цилиндрическую. Дно внешнего цилиндра расположена под небольшим углом к перпендикуляру вертикальной оси. На рисунке 5.2 приведено сечение двухзонной мишени по вертикальной оси.

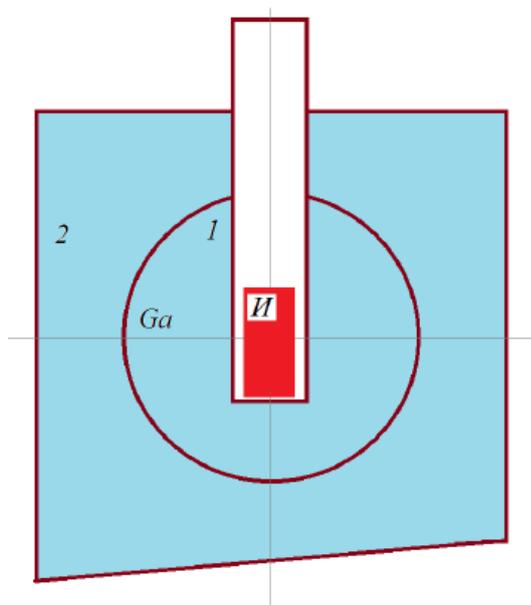


Рисунок 5.2 – Сечение двухзонной мишени

5.3.1.2. Форма зон мишени в трехзонном эксперименте BEST-2

Для получения трёхзонной мишени внешняя цилиндрическая зона двухзонной мишени будет разделена цилиндрической оболочкой на 2 части (рисунок 5.3). При радиусе цилиндрической оболочки $R_2 = 83$ см при высоте цилиндра, равной двум радиусам: $h = 2R_2$, средние пробеги нейтрино от источника в двух внешних зонах (2 и 3) будут примерно одинаковы и в каждой зоне равны половине от длины пробега во внутренней, шаровой, зоне.

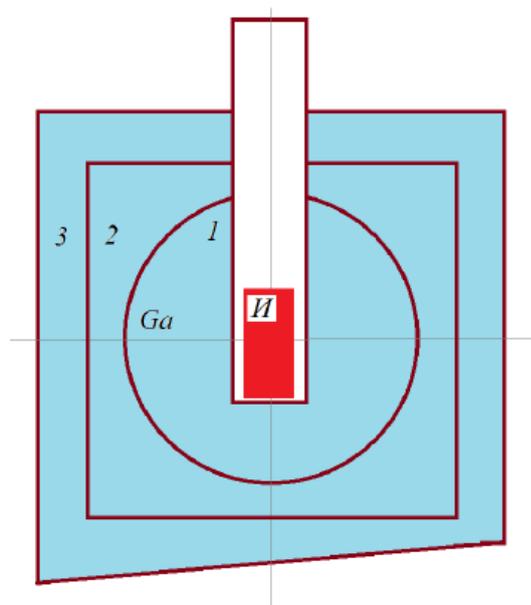


Рисунок 5.3 – Сечение трехзонной мишени с цилиндрической оболочкой между 2 и 3 зонами

Радиус цилиндрической оболочки между 2 и 3 зонами мишени равен $R_2 = 83$ см и высота цилиндра h равна двум радиусам, т.е. 166 см (рисунок 5.4). Это внутренние размеры цилиндра. Толщина стенок цилиндра будет соответственно увеличивать размеры. Цилиндрическая оболочка закрыта горизонтальными круглыми крышками. Центр цилиндра совпадает с центром сферы первой зоны мишени.

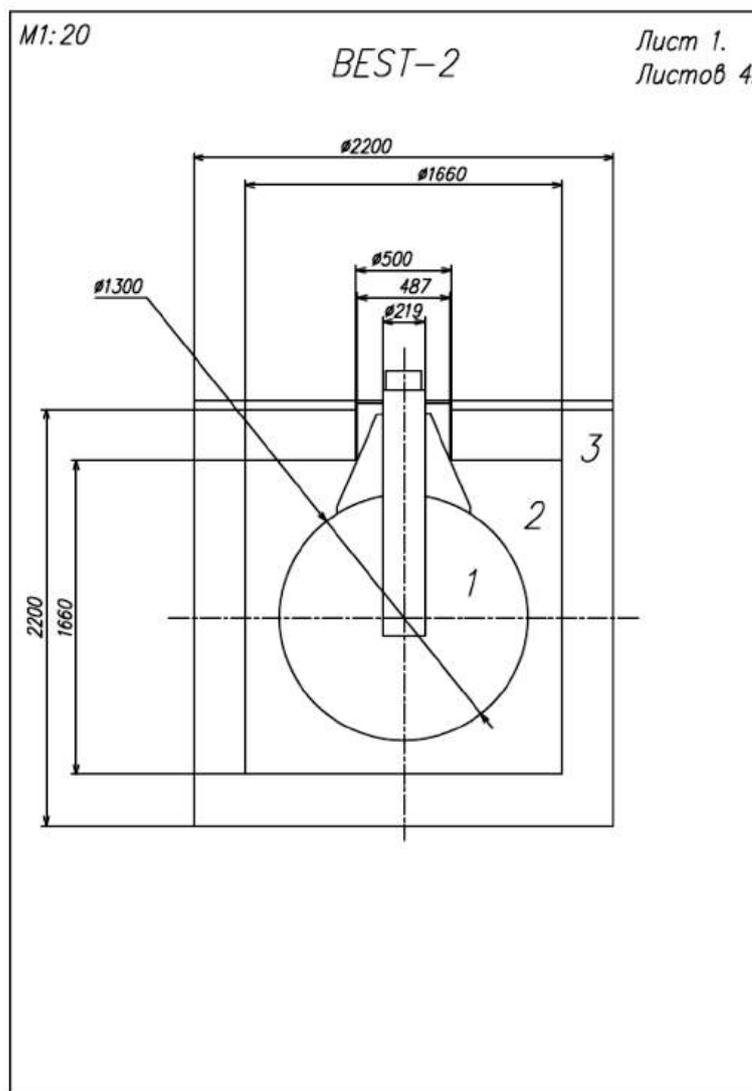


Рисунок 5.4 – Эскизный проект по модернизации двухзонной установки в трехзонную с внутренней цилиндрической оболочкой

5.3.1.3. Оптимизация формы зон мишени в трехзонном эксперименте BEST-2

Для того, чтобы более эффективно разделить сигналы от нейтринных захватов на разных расстояниях от источника, что является одним из важных преимуществ эксперимента BEST-2 перед его предшественником BEST, можно применить

комбинированную разделительную оболочку между зонами 2 и 3. На рисунке 5.5 приведено сечение трехзонной мишени, в которой оболочка между 2 и 3 зонами составлена из вертикального цилиндра (центральная часть), к которой сверху и снизу привариваются части в форме усечённых конусов. Коническая поверхность составляет 45° к основанию. Радиусы оснований конических поверхностей равны R_2 и $R_2/2$. Полная высота оболочки h равна $h = 2R_2$.

Для такой геометрии равенство пробегов во 2 и 3 зонах мишени будет при радиусе цилиндрической части $R_2 = 89$ см.

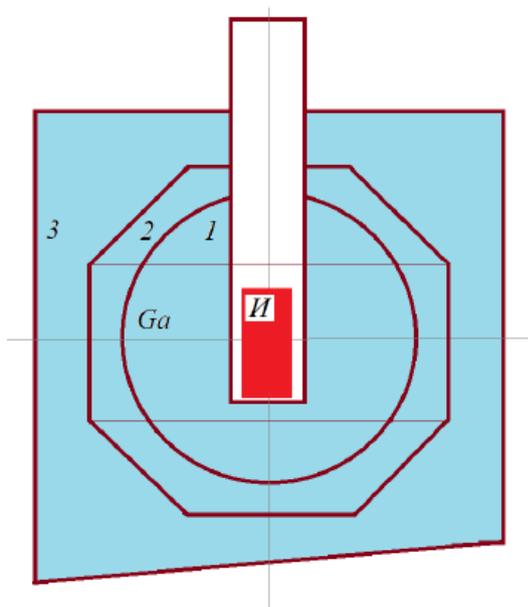


Рисунок 5.5 – Сечение трехзонной мишени с комбинированной оболочкой (цилиндр с двумя коническими поверхностями) между зонами 2 и 3

Радиус цилиндрической оболочки между 2 и 3 зонами мишени равен $R_2 = 89$ см и высота оболочки h равна двум радиусам, т.е. 198 см. Конусы соединяются с цилиндром на высоте, равной половине радиуса R_2 (44,5 см). Концевые крышки конусов имеют радиусы $R_2/2 = 44,5$ см. Центр цилиндра совпадает с центром сферы первой зоны мишени (рисунок 5.6).

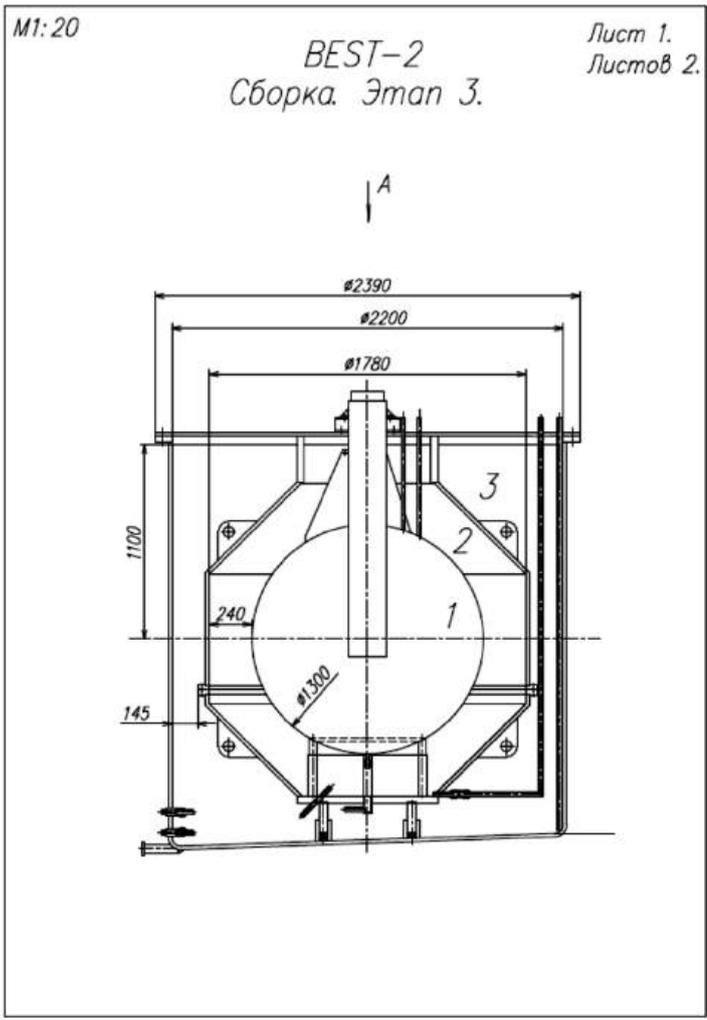


Рисунок 5.6. – Эскизный проект по модернизации двухзонной установки в трехзонную с внутренней комбинированной оболочкой

5.3.1.4. Преимущество комбинированной оболочки

На рисунках 5.7 и 5.8 приведены вероятности захвата нейтрино в каждой из трёх зон в зависимости от расстояния до источника. Эти функции используются для определения допустимых параметров осцилляций, для полученного результата измерений. Площади фигур под кривыми 2 и 3 одинаковы и равны половине площади под кривой 1 ($s_1 = s_2 = s_3/2$). Именно это показывает соотношение ожидаемых скоростей захвата нейтрино в зонах мишени в отсутствие осцилляций.

Затенённая часть рисунков – совместная часть под кривыми 2 и 3 – показывает вероятности, с которыми нейтринные события не могут быть разделены по расстояниям (s_{23}). В случае цилиндрической оболочки вероятность смешивания между 2 и 3 зонами составляет $p_{\text{цил}} = s_{23} / s_2 = 33.3\%$. Если применить комбинированную оболочку, то вероятность смешивания уменьшается в 1.7 раза ($p_{\text{комб}} = 19.4\%$).

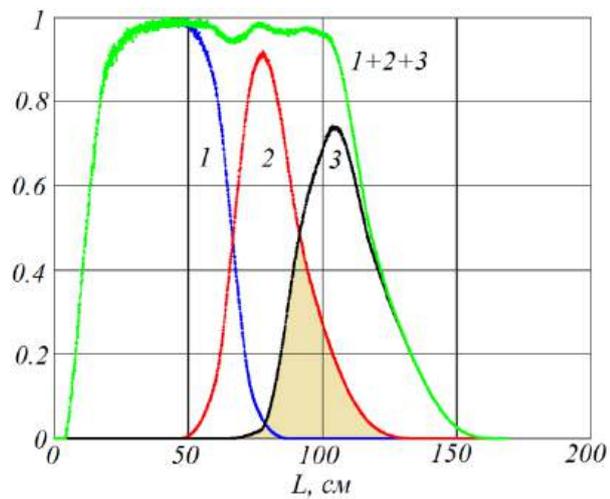


Рисунок 5.7 – Зависимости захвата нейтронов от источника в трёх зонах мишени для цилиндрической оболочки между 2 и 3 зонами

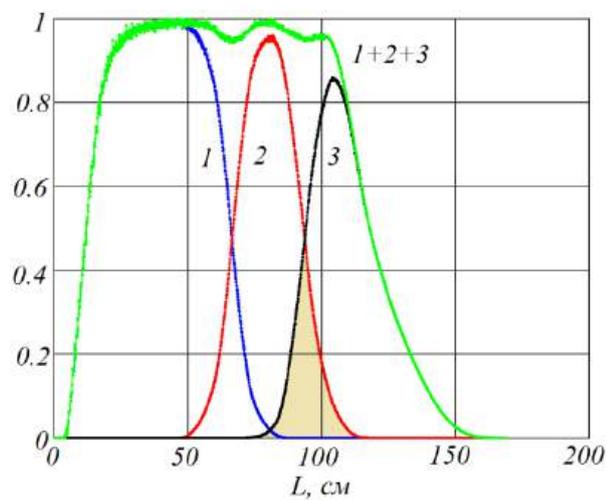


Рисунок 5.8 – Зависимости захвата нейтронов от источника в трёх зонах мишени для комбинированной оболочки между 2 и 3 зонами (цилиндр + конусы)

Из рассмотренных двух вариантов модернизации двухзонной мишени в трехзонную для результатов эксперимента предпочтительней вариант с комбинированной внутренней оболочкой, состоящей из цилиндрической обечайки с двумя усеченными конусами, сверху и снизу.

6. Проведение физических измерений на полутонном прототипе ББНТ

В 2025 году продолжались измерения на полутонном прототипе ББНТ.

Ведутся измерения уровня фоновых событий – потоков мюонов космических лучей и внутренней и внешней радиоактивности с энергетическим порогом ~ 20 кэВ. По этим данным получены ограничения на концентрацию радиоактивного изотопа углерода ^{14}C — отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-16}$ г/г, а также концентрации ^{238}U и ^{232}Th на уровне $< 10^{-15}$ г/г. Ведутся работы по дальнейшему улучшению параметров полутонного прототипа для достижения чувствительности измерений концентрации ^{14}C до уровня $\leq 10^{-18}$ г/г, а для ^{238}U и ^{232}Th до уровня $\sim 10^{-17}$ г/г.

В полутонном прототипе с помощью набора радиоактивных источников гамма-квантов с энергиями измерена нелинейность энергетического отклика в диапазоне энергий 32 кэВ — 2,5 МэВ. Максимальная нелинейность энергетического отклика детектора в этом диапазоне энергий составляет 15%. Нелинейность начинает проявляться при энергиях гамма-квантов меньше 300 кэВ.

Нелинейность отклика обусловлена гашением сцинтилляционного излучения при энергиях электронов меньше 300 кэВ. Эффект гашения характеризуется коэффициентом Биркса. Измеренное из данных нелинейности энергетического отклика значение коэффициента Биркса составляет: $K_B = 0,016 \pm 0,001 \text{ см} \cdot \text{МэВ}^{-1}$.

Продолжены долговременные измерения стабильности параметров жидкого сцинтиллятора полутонного прототипа ББНТ, начатые в 2019 году. Измерения показывают, что сцинтилляционные параметры сцинтиллятора (световыход и кинетика свечения) остаются неизменными в пределах ошибок измерений.

7. Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле

Проведен анализ экспериментального спектра одиночных событий детектора *Borexino*, полученного в 2022 г. [45]. В анализ были включены потоки антинейтрино, которые регистрируются детектором наряду с потоками нейтрино, но не были учтены при анализе коллаборацией *Borexino* ввиду их ожидаемой малости. Скорость счета событий от распадов ^{40}K , включая как события от антинейтрино, так и нейтрино, оказалась значительно больше ожидаемой исходя из общепринятой модели Земли (BSE — Bulk Silicate Earth) и совпадает с предсказываемой другой моделью Земли — «Богатая водородом Земля» (Hydride Earth). Скорость счета одиночных событий от других антинейтринных потоков, генерируемых в Земле изотопами естественной радиоактивности, а также ядерными реакторами атомных электростанций, в результате нашего анализа оказалась близкой к нулю. Эта величина согласуется с результатом анализа парных событий, проведенного коллаборацией *Borexino*. Таким образом, полученный нами нулевой результат подтверждает справедливость идеи о том, что скорости счета различных событий, полученные при минимальном значении χ^2 , соответствует лучшей модели источников событий, наиболее адекватно отражающей реально существующую в природе ситуацию. Установлено, что с учетом всех антинейтринных потоков анализ становится более стабильным, несмотря на малость некоторых из них.

Например, поток борных нейтрино в анализе без антинейтринных потоков стремится к нулю, а при включении антинейтринных потоков принимает нормальное значение, соответствующее модели LZ. Поток геонейтрино ^{40}K , включающий в себя как антинейтрино, так и нейтрино, оказался значительно больше ожидаемого, исходя из общепринятой модели Земли.

Все полученные потоки солнечных нейтрино согласуются с солнечной моделью малой металличности (LZ) при учете всех антинейтринных потоков и геонейтрино от ^{40}K .

Коллаборация *Borexino* интерпретирует свои данные в рамках модели BSE – Bulk Silicate Earth и модели Солнца с высокой металличностью. В ИЯИ РАН была дана иная интерпретация тех же данных в рамках гидридной модели Земли и модели Солнца с низкой металличностью. Чтобы понять, какие события происходят в природе, энергетический спектр единичных событий в Борексино был численно смоделирован с использованием метода Монте-Карло для различных предположений о процессах, которые могут существовать в природе [46]. Были рассмотрены как существование большого потока

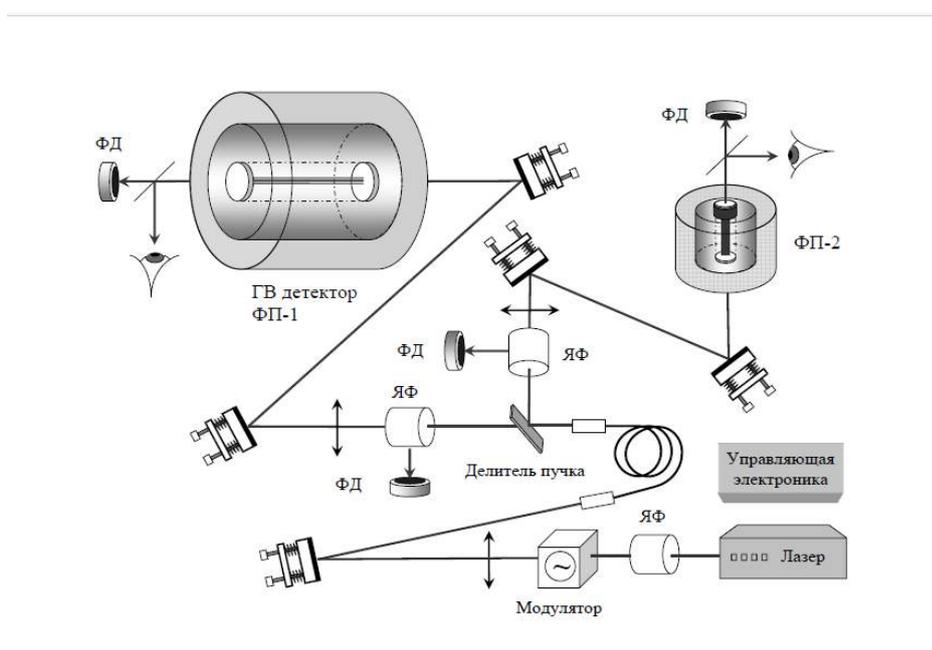
геоантинейтрино калия, так и его отсутствие. В то же время при моделировании учитывалась высокая или низкая металличность Солнца. Сравнение восстановленных скоростей счета по смоделированным данным с реконструкциями по спектру одиночных событий в Борексине показывает, что большой поток геоантинейтрино калия при низкой металличности Солнца является предпочтительным и реализуется в природе.

Л.Б. Безруков и В.В. Синёв (ИЯИ РАН) сделали доклад на тему «Общая причина нагрева океанов и уменьшение длительности суток Земли» на конференции «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию МГУ)» в ГАИШ МГУ, 23-25 июня 2025 года. Доклад принят к печати в *Moscow University Physics Bulletin* 80(7), (2025). В этом докладе основываясь на Гидридной модели Земли, нами была введена и рассматривалась гипотеза о том, что механизм охлаждения недр Земли остановился около 100 лет назад в связи с тем, что стало сложно расширяться вновь появившимся металлам против возрастающего веса мантии. Можно сделать прогноз, что в течение следующих 100 лет океан нагреется на 0,7 градуса. За это время геофизики должны развить Богатую водородом модель Земли и дать долгосрочный прогноз развития Земли и климата.

8. Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций

8.1. Результаты эксплуатации оптоакустической гравитационной антенны ОГРАН в режиме длительных наблюдений и поиска нейтрино - гравитационных корреляций

Принцип действия антенны ОГРАН базируется на классической схеме (рисунок 8.1), известной как «компаратор частотных эталонов», в которой детектируемый сигнал появляется в результате сравнения пары высокостабильных оптических резонаторов.



ФП — эталон Фабри-Перо, ФД — фотодиод, ЯФ — ячейка Фарадея

Рисунок 8.1 – Принципиальная схема оптоакустической гравитационной антенны ОГРАН

Внешний одно-модовый лазер, используемый для оптической накачки антенны, замкнут цепью обратной связи с протяженным высокодобротным оптическим эталоном – интерферометром Фабри-Перо (ФП-1). Зеркала этого эталона закреплены на торцах акустического резонатора (в форме большой алюминиевой болванки или стержня) длиной $L=2$ м и массой $M \approx 2$ т, имеющего центрально осевой канал для прохода оптического излучения.

Гравитационная волна вызывает возмущение как акустической, так и оптической степеней свободы, сдвигая частоту оптического резонанса. Система обратной связи

соответственно перестраивает частоту генерации лазера, удерживая резонансную настройку ФП-1. Таким образом гравитационные возмущения кодируются в вариациях частоты накачки антенны. Эти вариации регистрируются с помощью дифференциальной схемы (компаратора), содержащей второй короткий ФП резонатор (ФП-2), (закрепленный на малой твердотельной болванке $l = 45$ см), который работает как оптический частотный дискриминатор. Для увеличения температурной стабильности тело короткого эталона выполнено из материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения - ситалла СО-115М.

Выходной сигнал такой схемы пропорционален разности частот лазера (эталона ФП-1) и дискриминатора (эталона ФП-2). В результате, частота лазерного излучения содержит информацию о гравитационных возмущениях оптоакустического детектора ОГАН (изменения базы зеркал ФП-1 или вариации показателя преломления между ними).

Исходный рабочий режим или «рабочая точка антенны» в точности соответствует резонансной настройке обоих оптических резонаторов. Для большого резонатора ФП-1, это достигается путем изменения частоты накачки лазера. Для малого опорного ФП-2 резонансная настройка обеспечивается закреплением одного из его зеркал на пьезо-керамической таблетке, которая по низкой частоте управляется напряжением цепи обратной связи. Таким образом резонансная частота дискриминатора фиксируется на низких частотах (ниже 100 Гц). На сигнальных частотах, близких к 1 кГц, зеркала дискриминатора оказываются свободными и разностный сигнал компаратора пропорционален величине возмущения, производимого гравитационной волной (ГВ). Сигнал ошибки в обоих плечах (детектора и дискриминатора) получается с помощью известной схемы Паунда-Дривера-Холла, которая предполагает введение фазовой модуляции (на радиочастоте 10.7 МГц) входного оптического излучения. Отраженный от опорного резонатора (дискриминатора) луч синхронно с радиочастотой демодулируется на фотодетекторе. Амплитуда фототока пропорциональна разнице между частотой лазерного излучения и собственной частотой эталона ФП-2, которая предполагается достаточно стабильной. Для устойчивого функционирования всей антенны предусмотрена также стабилизация амплитуды лазерной накачки.

Оптическая схема ОГАН в отсутствие внешних гравитационных возмущений должна работать в режиме нулевого выходного сигнала (работа «в темном пятне», как принято во всех больше-базовых лазерных гравитационных интерферометрах). В то же время она не требует непосредственной интерференции между двумя лучами плеч, что существенно облегчает техническую реализацию детектора. За счет применения

резонаторов Фабри-Перо с большой резкостью достигается эквивалентное увеличение базы ОГРАН, ведущее к росту чувствительности антенны. Расчетный уровень чувствительности достаточен для регистрации всплесков ГВ от источников, расположенных в нашей Галактике. Технические детали устройства и функционирования антенны ОГРАН содержатся в публикации [47].

При долговременной непрерывной работе установки ОГРАН исследованы особенности её тепловой релаксации, показавшие важность активной термо-стабилизации камеры ВК-10 акустического детектора. Требуется прецизионный температурный контроль теплового режима камеры ВК-10 с помощью активного термо-чехла, подобного используемому для камеры дискриминатора.

Функционирование детектора ОГРАН предполагает также контроль сейсмического фона по длине туннеля БНО. Эти данные используются при фильтрации аномальных выбросов установки. Они позволяют также выполнить расчет гравитационных возмущений, индуцированных сейсмической динамикой (вариациями плотности среды) или т.н. «ньютоновских (или гравитационных) шумов», от которых нет экранировки. Поиск европейских подземных лабораторий с низким уровнем ньютоновского шума актуален в связи с проблемой размещения гравитационно-волновых интерферометров нового поколения. В отчетный период был продолжен статистический анализ многолетнего банка данных по сейсмо-гравитационным шумам в БНО в предположении, что детектором служит оптический интерферометр на свободных массах. Вычисления потенциального вклада в ньютоновский шум по микро - сейсмическим данным, полученным в главной штольне БНО, показывают, что этот предел значительно ниже требований, предъявляемых к такому известному 3G-детектору как «Телескоп Эйнштейна». В целом подтверждается высокое качество площадки БНО как места для размещения будущих поколений гравитационных детекторов.

Потребность высококачественной термо-стабилизации акустического резонатора детектора ОГРАН была установлена при слежении за спектральной плотностью теплового пика его броуновского шума. Измерения спектра многократно проводились со спектральным разрешением 0,001 Гц. Центр резонансного пика ОГРАН приходится на частоту 1,3 кГц.

Даже очень слабые вариации (в пределах динамического диапазона) температуры акустического детектора ОГРАН влияют на положение центральной частоты броуновского пика. Отношение сигнала к шуму в таких измерениях зависит от точности оптических настроек и при удовлетворительной настройке достигает 60. Ширина резонансного пика

составляет 0,002 Гц. Для его качественного спектрального разрешения необходимо накапливать сигнал не менее 1000 секунд. При этом в спектре внутри полосы резонансного пика попадут три точки дискретизации. Стабильность положения пика и полосы приема гравитационного сигнала важны для качественной работы детектора, в частности, для накопления слабых сигналов. Первые эксперименты обнаружили необходимость системы прецизионного активного удержания центральной частоты и обеспечения стабильного теплового фона в прилегающих помещениях в целом. При этом скорость релаксации температуры в режиме полного захвата составляет порядка 700 часов.

Расчет показывал, что для выхода системы регистрации за границы диапазона слежения достаточно изменения температуры детектора на 0,01 градуса. В связи с этим было принято решение экранировать вакуумную камеру основного детектора активным термо-чехлом с внутренним подогревом. Чехол представляет собой многослойную конструкцию, описанную ранее в предыдущих технических отчетах и статьях.

После установки термо-чехла на вакуумную камеру основного детектора температурная стабильность установки повысилась на два порядка. Уходы за границы диапазона слежения прекратились, установка перестала «чувствовать» присутствие человека рядом с камерой. Срывы слежения (рабочей точки) в обновленной установке происходят весьма редко, и в основном из-за внешних сейсмических воздействий или электрических импульсных наводок.

Кроме экспериментальных работ с установкой ОГРАН, описанных выше, в отчетный период проводились теоретико-прикладные исследования.

Уточнялась стратегия параллельных наблюдений на ОГРАН и БПСТ для фильтрации сигналов коллапсаров. Требовалась конкретизация схемы анализа данных при совместном поиске совпадающих нейтринных и гравитационных событий. Конечной целью является выход на режим непрерывного поиска (ν -gw) событий на детекторах БПСТ и ОГРАН.

В результате проведенных исследований был предложен конкретный алгоритм регистрации феномена нейтрино-гравитационной корреляции (стимулированный явлением SN1987A). Практическая отработка алгоритмов поиска двухканальных корреляций была проведена на временных отрезках конечной длительности с реальными выходными сигналами детекторов ОГРАН и БПСТ [48, 49].

Для детальной обработки был выбран временной отрезок между временными метками 1123–1855 ч, содержащий интервал 20 с, в котором наблюдалось 6 нейтринных событий. Получена выборка пар (X, Y) нейтрино-гравитационных событий. Вначале

определяется x_i – количество событий на нейтринном детекторе БПСТ в интервале 20 с; параллельно на гравитационном детекторе ОГРАН определяются значения y_j – количество выбросов за порог $1,5\sigma$ (и $3,5\sigma$) синхронных с БПСТ или с возможным сдвигом τ . В простейшей обработке, результаты которой приведены ниже, экстремум по величине временного сдвига не вычислялся. Гипотеза о наличии (или отсутствии) корреляции между случайными цепочками x_i, y_j проверялась с использованием критерия Стьюдента. Для проверки конкурирующих гипотез H_0 (нет корреляции) против гипотезы H_1 (есть корреляция) следует вычислить наблюдаемое значение случайной переменной t_0 (достаточной статистики) с $k = n - 2$ степенями свободы [50]. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $n = 95$ (на отрезке 20 сек интервал с числом нейтринных событий 6 и прилегающие к нему 20 секундные интервалы до и после) подсчет дает $t_0(\alpha, k) \approx 0,109173$. Из таблиц статистики Стьюдента следует, что критическая квантиль находится в границах $1,98 < t_0 < 2,0$, т.е. на порядок больше полученного экспериментального значения. Таким образом следует принять гипотезу об отсутствии значимой корреляции между цепочками нейтринных и гравитационных данных в данном иллюстративном примере. Очевидно, однако, что был использован упрощенный алгоритм без вариаций наблюдаемой по величине взаимного временного сдвига нейтрино-гравитационных данных.

8.2. Регистрация астро-геофизических возмущений кольцевым лазерным интерферометром (Гироскоп Саньяка), результаты эксплуатации Гироскопа Саньяка

Детектор ОГРАН конструктивно представляет дифференциальную схему двух оптических эталонов – резонаторов Фабри-Перо с общим источником оптической накачки. Плечи детектора (эталон) по-разному реагируют на действие гравитационной волны благодаря их разным геометрическим размерам и ортогональной ориентации. Выходной сигнал ОГРАН пропорционален разности энергий оптических эталонов, в то время как у гравитационных интерферометров конструкции «майкельсона» на подвесных зеркалах он пропорционален энергии интерференции световых потоков плеч.

На текущем этапе развития гравитационно-волновой астрономии внимание привлечено к интерферометрам комбинированного типа, сочетающим майкельсоновские интерферометры с ФП-эталоном и кольцевыми интерферометрами типа Гироскопа Саньяка (ГС). Последний инструмент представляет грави-инерциальный датчик вращательных и наклонных возмущений платформы, на которой он установлен. При использовании зеркал высоких технологий (с рекордной рефлексивностью и исчезающе малыми потерями) он превращается в уникальный прецизионный инструмент для фундаментальных и прикладных задач астрофизики и гравитации.

На предыдущем этапе исследований был выполнен ряд экспериментальных исследований с модельным прототипом кольцевого лазера ГС на московской экспериментальной площадке ГАИШ МГУ. Модель изготовлена по заказу в НИИ «Полус» с параметрами, рассчитанными заказчиком (группой ГАИШ).

Основной целью проекта ГС является разработка и конструктивная реализация Большого Лазерного Гироскопа (БЛГ) в подземных условиях БНО ИЯИ РАН с разрешением по угловой скорости Ω земного вращения $\sim 10^{-9}$ Ω . На пути к этой цели конкретной задачей первого подготовительного этапа представляется создание прототипа ЛГ (гироскопа дециметрового масштаба) с чувствительностью к вращательным ускорениям (10^{-7} – 10^{-8}) рад/(сГц^{1/2}), достаточной для регистрации вариаций скорости земного вращения с точностью в тысячные доли процента за время порядка одного часа. Также выполнение измерений фона деформационных наклонов главной штольни БНО на уровне тысячных долей угловой секунды. Сбор банка деформационно-вращательных измерений с целью прогнозирования возможности создания крупногабаритного ЛГ (2–3 м) с рекордной чувствительностью 10^{-9} рад/(сГц^{1/2}) к вращательным ускорениям в специфике условий подземных лабораторий БНО ИЯИ РАН.

Для отработки техники непрерывной эксплуатации датчиков в московской лаборатории была собрана установка на базе навигационного датчика НПО Полус с длиной периметра $L \sim 20$ см и масштабным коэффициентом $M = 2,75$. (коэффициент преобразования вращения платформы в расщепление мод Саньяка). Схема управления обеспечивает стабильность тока разряда на уровне 0,1%, а также оснащена системами: перестройки резонатора между 4-мя последовательными продольными модами резонатора, формирование знакопеременной частотной подставки и ее дополнительную модуляцию медленным меандром для уменьшения влияние динамических зон захвата. Сбор данных автоматизирован и совмещен с контролем температуры датчика и системой контроля стабилизации резонатора. Для экранирования от внешних магнитных полей датчик помещен во внешний магнитный экран, изготовленный из трех слоев пленки ММР-50, обеспечивающий ослабление поля не менее чем на порядок.

Для широты нашей лаборатории (55,70639° с.ш.) расчетное значение угловой скорости составляет 12,426 угл. сек./с. Результирующее среднее значение скорости вращения, полученное в наших экспериментах, составило $12,41 \pm 0,01$ угл. сек./с (здесь и далее точность измерения задается стандартным отклонением результатов измерений от среднего значения). Наблюдается также явная корреляция изменения температуры датчика и детектируемой скорости. Наш эксперимент проводился без какой-то специализированной

системы стабилизации температуры. Данные, получаемые на участках с малыми изменениями температуры, обладают гораздо меньшей дисперсией, нежели вся картина в целом. Это позволяет надеяться, что дополнительная термо-стабилизация датчика позволит уменьшить дисперсию и выйти на уровень точности 10^{-3} угл. сек/с ($\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц^{1/2})) при накоплении данных за один час измерений.

Пути повышения чувствительности и точности измерений сводятся к двум техническим моментам: улучшения экранирования от внешнего магнитного поля и температурная стабилизация до уровня $\sim 1^\circ\text{C}$. Кардинальной методикой остается подземное размещение модели датчика ГС в штольне БНО ИЯИ РАН.

Подземная лаборатория с установкой ОГРАН находится в главной штольне БНО на пикете ПК-14 на удалении 1350 м от входа в тоннель. В этой лаборатории был также установлен оптический стол с пилотной моделью ГС, см. рисунок 8.2.

Температура лаборатории устанавливается внешними условиями на уровне $19,5^\circ\text{C}$, сезонные колебания температуры не превышают 2°C . В основной камере система температурной стабилизации удерживает значение 25°C с точностью не хуже $0,1^\circ\text{C}$ (указано стандартное отклонение).



Оптический стол с моделью ГС внутри цилиндрической капсулы магнитного экранирования; рядом корпус электронного блока управления. На приборной стойке: измерительные блоки с блоком питания, РС контроля эксперимента
Рисунок 8.2 – Фото установки пилотной модели ГС в подземной лаборатории ОГРАН на пикете ПК-14

Также осуществляется непрерывный сбор данных с двух наклономеров (ориентированных север-юг, запад-восток), установленных рядом с ЛГ в непосредственной близости от ЛГ. Сейсмический фон в подземных лабораториях БНО относится к

естественным шумам окружения, ограничивая реальную разрешающую способность датчиков, которые там установлены. Сейсмо-фон периодически подвергался тщательным измерениям. Характерные амплитуды наклонов шумового сейсмического фона лаборатории лежат в пределах долей угловых секунд.

Модель ЛГ на основе датчика К5 (НИИ Полус) в двух магнитных экранах, блок управления, компьютер с системой сбора и обработки данных размещался на немагнитном оптическом столе на гранитном постаменте в термо стабилизированной камере подземной лаборатории. Корпус датчика располагался горизонтально поверхности земли. Конструкция датчика К5 и его системы управления позволяют реализовывать различные режимы работы. Основной проблемой зеемановских ЛГ, ограничивающих их чувствительность и стабильность, является крайне высокая чувствительность к внешним и внутренним магнитным полям. Учитывая накопленный опыт, нами был выбран квази четырех частотный режим со знакопеременной прямоугольной магнитной подставкой и дополнительной модуляцией медленным прямоугольным меандром [51]. В результате использования такой параметрической техники можно добиться максимального снижения размеров динамических зон захвата, что позволяет максимально линеаризовать выходную характеристику ЛГ, уменьшить влияние внутренних и внешних магнитных полей, уменьшить дрейф нуля. В наших экспериментах частота знакопеременной подставки составляла 250 Гц и амплитуда 30 кГц. Частота медленного меандра – 4 Гц. Учитывая необходимость долговременной работы датчика и технические особенности пересылки данных в ГАИШ МГУ, был выбран интервал (длительность) работы на одной моде в 320 с. Период накопления данных для съема одного измерения составлял 12,8 с.

Полное время контрольных наблюдений составило 6 месяцев. Измеренное среднее значение скорости земного вращения подтвердило теоретически ожидаемое значение $10,32704$ °/ч, а величина стандартного отклонения по этим данным составляет $0,0011$ °/ч, что соответствует чувствительности $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/с^{1/2}.

Кроме получения данных непрерывной записи скорости вращения, проведен эксперимент по измерению скорости при калиброванных наклонах датчика. При этом меняется проекция вектора земной угловой скорости на вертикальную ось чувствительности датчика (нормаль к плоскости кольца гироскопа), что регистрируется как эквивалентные изменения в показаниях угловой скорости. Калибровочный стенд позволял минимально изменять угол наклона датчика на величину $1,9'$. Наклон осуществлялся в направлении на север для облегчения пересчета получаемых данных в вариации скорости вращения. Ошибка в определении направления на сервер составляла $\sim 2^\circ$. Для вариации угла

наклона на минимальное значение в $1,9'$, время усреднения выбиралось ~ 4 ч; при этом стандартное отклонение составило $7 \cdot 10^{-4}$ "/с, а само изменение величины скорости $0,006$ "/с.

Таким образом можно утверждать, что мы уверенно детектировали эквивалентное изменение скорости, имитируемое наклоном оси чувствительности датчика, а стандартное отклонение в $7 \cdot 10^{-4}$ "/с за 4 ч соответствует чувствительности $0,08$ "/с^{1/2} или дрейфу нуля $1,3 \cdot 10^{-3}$ °/ч. Для больших величин углов времени усреднения выбирались в диапазоне от 1 ч (для угла $3,8'$) до 1 мин (для угла $66,8'$). Отметим, что по результатам исследований шумового фона штольни БНО ИЯИ характерные амплитуды наклонных колебаний земной поверхности лежат в диапазонах десятых долей угловых секунд [51]. Соответственно, для нашей модели ГС достигнутая чувствительность не позволяет детектировать фоновые сейсмические помехи такого уровня.

8.3. Обсуждение результатов мониторинга гравитационно-волновых всплесков

За время проведения эксперимента никаких заметных гео-событий не произошло, температура оставалась стабильной, на больших временных участках отсутствовали внешние возмущения. Соответственно, по этим участкам можно оценить статистические характеристики шумов нашей системы. Наиболее полную информацию о статистике шумов системы и возможности достижения максимальной точности дает метод вариаций Аллана, который является общепринятой методикой в оценке параметров стандартов частоты, а в последние годы активно развивается и в гироскопии (см. Overlapping Allan Variation). Для нашей модели ГС кривая Аллана выходит на стационарный уровень для времени усреднения ~ 320 с, которое точно совпадает с периодом переключений между модами в квази-четырёх частотном режиме. Минимум дисперсии достигается на временах $\sim 10^5$ с. Дальнейшее увеличение времени усреднения уже не приводит к увеличению точности измерений. Согласно опытным данным, мы можем использовать времена усреднений до 10^5 с, получая при этом ошибку измерений в $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ °/ч. Это время усреднения было использовано для градуировки нашего датчика. Рассчитанное среднее значение скорости вращения при усреднении окном 10^5 с позволило определить смещение нуля датчика равное $0,2789$ °/ч.

Основной результат исследований пилотной модели ГС в подземной лаборатории БНО можно сформулировать следующим образом.

Подтверждена возможность применения лазерного гироскопа для различных типов геофизических измерений. Проведены первые эксперименты по непрерывной записи

данных о скорости вращения Земли с помощью зеemanовского ЛГ (периметр резонатора ~ 20 см) длительностью более полугода в подземной лаборатории БНО ИЯИ. Размещение ЛГ в подземной лаборатории позволило достигнуть чувствительности на $3 \cdot 10^{-7}$ рад/с^{1/2}, что отвечает величине стандартного отклонения 10^{-3} °/ч при накоплении данных за 1 ч. Полученный результат лучше на порядок, по сравнению с экспериментами, проводимыми в московской лаборатории. Определяющим фактором в улучшении чувствительности явилась ослабление сейсмических возмущений и стабилизация температуры датчика на уровне меньше одной десятой градуса.

9. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторе LVD (Гран Сассо, LNGS)

9.1. Детектор для регистрации нейтрино от вспышек Сверхновых

Многофункциональный детектор большого объема LVD [52] сконструирован в рамках Российско-итальянского международного соглашения для проведения исследований в области физики частиц и астрофизики. Детектор расположен в Лаборатории Гран Сассо, Италия на глубине 3600 м в.э. Установка состоит из 840 полуторакубовых (1,5 м×1 м×1 м) сцинтилляционных счетчиков, образующих модульную структуру. Детектор LVD состоит из трех башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по пять колонн в каждой. В такой конфигурации установка работает с 2002 г. Эффективное время работы LVD составляет 99,8%.

Экспериментальные данные поступают независимо с каждого счётчика. Условием регистрации события в детекторе LVD является трёхкратное совпадение откликов ФЭУ от энерговыделения 5 МэВ в отдельном его счётчике в пределах 250 нс. Энерговыделение 5 МэВ в счётчике является верхним энергетическим порогом HET (High Energy Threshold) регистрации событий. При выполнении условия регистрации события во всех счётчиках одной из четырех групп счётчиков башни регистрируются энерговыделения более 1 МэВ при условии трёхкратного совпадения откликов ФЭУ в счётчике. Каждая башня включает в себя 280 счётчиков. Значение величины энерговыделения 1 МэВ – это нижний энергетический порог LET (Low Energy Threshold) регистрации в детекторе LVD. Длительность записи данных после выработки HET-триггера составляет 1 мс.

9.2. Обработка и анализ экспериментальных данных в режиме on-line

В эксперименте LVD проводится анализ данных в режимах on-line и off-line [53]. Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме on-line осуществляется во временном окне меньше 20 с и с энергией импульсов выше 4 МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона в реакции обратного бета-распада. 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 [54]. Всего в систему SNEWS было послано 180 алармов. За время существования SNEWS не было ни одного совпадения алертов между установками, входящими в эту систему. Поиск кластеров нейтринных событий-кандидатов off-line осуществляется в течение временного окна с длительностью до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется длительностью временного окна и количеством в нём событий.

9.3. Методы и проблемы поиска вспышек сверхновых в режиме off-line

Большое количество ложных сигналов о регистрации нейтрино от вспышки сверхновых объясняется тем, что при анализе экспериментальных данных в режиме on-line используются данные без предварительной обработки. Такой подход оправдан тем, что при достаточно близкой от Земли вспышки сверхновой, вспышка будет зарегистрирована и о регистрации будет известно незамедлительно. Кроме того, вспышка будет одновременно зарегистрирована и на других экспериментальных установках, входящих в систему SNEWS.

Обработка экспериментальных данных с детектора LVD в режиме off-line начинается с проведения временной и энергетической калибровок экспериментальных данных. Временная калибровка необходима для определения абсолютного времени зарегистрированного события и относительного времени срабатывания счётчиков в событии. Например, при регистрации одиночного мюона сработают минимум два счётчика по высокому энергетическому порогу в течение 250 нс. Точность временных калибровок позволяет отделять мюоны, пришедшие из верхней полусферы от мюонов, пришедших из нижней полусферы. Энергетическая калибровка необходима для измерения энергосодержания в счётчиках при регистрации событий. Результатом энергетической калибровки являются пороговые значения энергосодержаний в счётчиках для высокого и низкого порога регистрации, соответственно. Каждый счётчик калибруется отдельно, информация о калибровках хранится постоянно, с её помощью осуществляется мониторинг стабильности работы счётчиков. В случае подтверждения регистрации нейтрино от сверхновой с других экспериментов, задействованных в системе SNEWS, калибровка данных с детектора LVD начнётся незамедлительно. В обычном режиме информация о калибровках обновляется один раз в месяц. Такой срок достаточен для набора статистики, необходимой для проведения калибровки нормально функционирующего счётчика.

После проведения калибровки экспериментальные данные можно использовать для дальнейшего анализа в режиме off-line. Для поиска нейтрино от вспышки сверхновой отбираются события, в которых было только одно срабатывание счётчика по высокому энергетическому порогу. Такое требование вызвано свойствами взаимодействия нейтрино с веществом, поскольку наиболее вероятным откликом детектора на регистрацию нейтрино как раз и является срабатывание одного счётчика по высокому порогу. Срабатывание счётчиков по нижнему порогу регистрируется в течение 1 мс после срабатывания счётчика по высокому порогу. Этот канал регистрации событий предназначен в основном для регистрации реакции обратного бета-распада. После предварительного отбора

экспериментальных данных строится распределение по средней скорости счёта сработавших счётчиков. Задача этого этапа отбора счётчиков – исключение из дальнейшего анализа счётчиков с большой скоростью счёта. Критерием отбраковки счётчиков является превышение скорости счёта счётчика больше, чем на три стандартных отклонения от среднего значения величины скорости счёта. После отбраковки счётчиков по указанному критерию для оставшихся счётчиков рассчитывается среднее значение и стандартное отклонение величины скорости счёта. Если после пересчёта параметров распределения скорости счёта имеются счётчики, у которых скорость счёта превышает значение средней скорости счёта больше, чем на три стандартных отклонения, то указанные счётчики исключаются из дальнейшего анализа. Отбор продолжается до тех пор, пока все значения скорости счёта не будут находиться в пределах трёх стандартных отклонений от среднего значения.

Кандидатом на нейтринную вспышку является превышение событий относительно ожидаемого количества фоновых событий. Скорость счёта фоновых событий в среднем является постоянной величиной. Критерием отбора кандидатов является превышение среднего значения скорости счёта больше, чем на три стандартных отклонения для выбранной длительности временного окна. Длительность временного окна выбирается исходя из требований к величине среднего значения скорости счёта фоновых событий и ожидаемого значения длительности нейтринной вспышки от сверхновой. Временное окно должно быть меньше, как минимум, в два раза ожидаемой длительности нейтринной вспышки. Средняя скорость счёта фоновых событий должна быть минимум в десять раз меньше ожидаемого значения при регистрации нейтринной вспышки. При регистрации нейтринной вспышки в нашей галактике ожидаемое количество зарегистрированных событий в детекторе LVD составляет более 100 событий в течение 20 секунд. Таким образом, целью обработки экспериментальных данных в режиме off-line является поиск нейтрино от вспышек сверхновых за пределами нашей галактики.

9.4. Результаты поиска нейтрино от вспышек сверхновых в режиме off-line

С помощью, разработанной нами методики были обработаны экспериментальные данные с детектора LVD за период с 01 января 2023 года по конец предыдущего месяца. В ходе обработки была выявлена высокая стабильность работы детектора, что выразилось в постоянном количестве отобранных счётчиков. Всего отобран 561 счётчик из 840, что составляет 67% от общего количества счётчиков в детекторе.

Общее количество отобранных событий составило 29 929 095. При выборе длительности временного окна равной 10 секунд ожидаемое количество событий в

выбранном временном окне будет составлять $29\,929\,095/1035/8640=3,35$ соб/10 с, где 1035 это количество суток с 01 января 2023 года по 31 октября 2025 года включительно, $8640=60\times60\times24/10$ – количество 10-секундных неперекрывающихся временных интервалов в сутки.

После обработки экспериментальных данных был получен временной ряд количества событий при длительности временного окна 10 секунд. На рисунке 9.1 представлен участок полученного временного ряда с 00:00:00 по 12:00:00 01 января 2025 года. На остальных участках временного ряда наблюдается схожая ситуация.

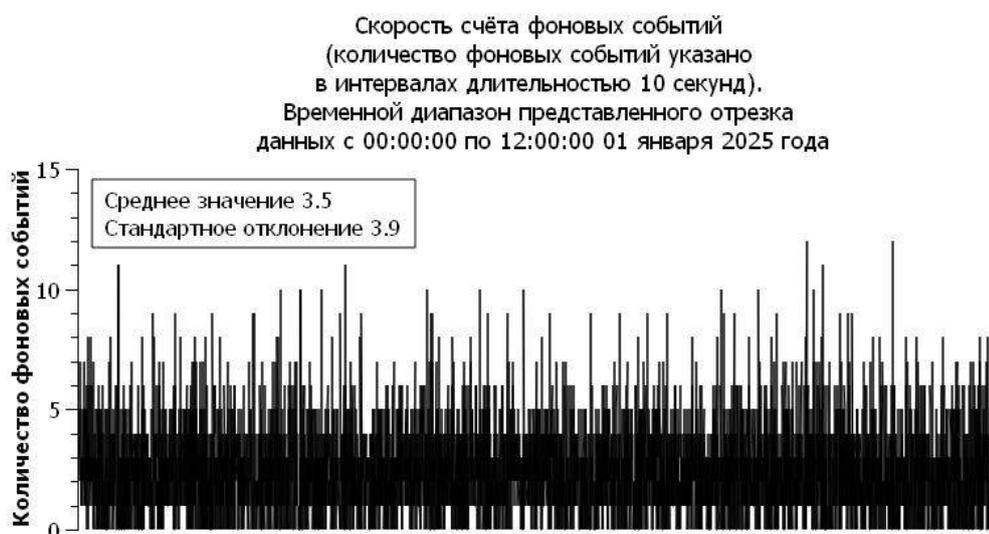


Рисунок 9.1 – Интервал временного ряда количества зарегистрированных событий в течение 10 секунд

Представленные на рисунке 9.1 результаты расчёта среднего значения и стандартного отклонения количества событий за 10 секунд были получены для всего временного ряда целиком, т.е. с 00:00:00 01 января 2023 года по 23:59:59 31 октября 2025 года. На всём протяжении временного ряда количество зарегистрированных событий не превышает три стандартных отклонения от среднего значения. Предварительно оценённое среднее значение (3,35 событий за 10 секунд) согласуется с рассчитанным средним значением на основе данных временного ряда (3,5 событий за 10 секунд). Полученные результаты позволяют заключить, что на рассмотренном временном отрезке экспериментальных данных не удалось обнаружить аномальные скопления событий (кандидатов на нейтринную вспышку от сверхновой). Таким образом, представленные результаты обработки экспериментальных данных показывают отсутствие кандидатов на регистрацию нейтрино от взрыва сверхновой.

10. Поиск совпадений нейтринных событий LVD (Гран Сассо, LNGS) с событиями от астрофизических источников

10.1. Возможные астрофизические источники нейтрино

Помимо образования нейтрино при взрыве сверхновой имеются и другие источники происхождения астрофизических нейтрино. К таким астрофизическим источникам можно отнести двойные системы, активные ядра галактик и вспышки гамма-излучения. Двойная система является системой из двух звёзд либо из звезды и компактной чёрной дыры, которая движется по замкнутой орбите вокруг общего центра масс. В двойных системах может происходить аккреция, т.е. передача вещества менее плотной и массивной звездой в двойной системе. Аккреция может привести к слиянию компонентов в двойной системе и в ходе слияния образуются астрофизические нейтрино. Слияния компонентов в двойных системах (звезда и нейтронная звезда, звезда и компактная чёрная дыра, две нейтронные звезды) были зарегистрированы методами гравитационно-волновой астрономии. Наиболее известное наблюдавшееся событие это GW170817 – регистрация гравитационных волн, испущенных в ходе процесса слияния двух нейтронных звёзд.

Активное ядро галактики представляет собой сверхмассивную чёрную дыру, которая находится в центре галактики. Чёрная дыра поглощает вещество в галактике. В этом случае также происходит аккреция и возможно образование астрофизических нейтрино. В настоящее время галактики, обладающие активными ядрами, называются активными галактиками.

Вспышки гамма-излучения (гамма-всплески) также являются источниками астрофизических нейтрино, поскольку причиной гамма-всплеска является кратковременный выброс высокой энергии. Такие выбросы энергии носят взрывной характер и при выбросах могут рождаться нейтрино высоких энергий. Например, слияние нейтронных звёзд помимо гравитационных волн образует гамма-всплеск, что экспериментально подтверждено. Гамма-всплеск GRB 170817A был зарегистрирован совместно с гравитационными волнами GW170817.

10.2. Поиск астрофизических нейтрино с помощью детектора LVD

Поиск нейтрино от других астрофизических источников, помимо нейтрино от взрывов сверхновых в нашей галактике, сравнительно новое направление исследований. Благодаря современным экспериментальным результатам имеются достоверные сведения об источниках астрофизических нейтрино. Однако напрямую искать нейтрино от подобных астрофизических источников с помощью детектора LVD является сложной экспериментальной задачей. Причиной сложности поиска являются расстояния до

сравнительно недавно обнаруженных источников астрофизических нейтрино. Например, вспышка сверхновой SN1987A была на расстоянии около 168 000 световых лет, а слияние нейтронных звёзд (событие GW170817) произошло на расстоянии около 130 000 000 световых лет, т.е. более чем в тысячу раз дальше. Таким образом, для поиска взаимодействия нейтрино от астрофизических источников в детекторе LVD необходимо использовать данные о времени регистрации возникновения астрофизических источников в рамках других экспериментов.

Возможность регистрации астрофизических нейтрино с помощью детектора LVD обусловлена двумя причинами. Во-первых, общее количество нейтрино может быть достаточно большим для их регистрации. Во-вторых, у потока астрофизических нейтрино может быть выделенное направление в пространстве. Общее количество нейтрино определяется высвобождающейся энергией в астрофизическом источнике. При образовании джета поток нейтрино имеет выделенное направление в пространстве и его затухание, связанное с разлётом нейтрино, происходит достаточно медленно по сравнению с равномерным выбросом нейтрино по всем направлениям. Таким образом, при регистрации нейтрино от дальних астрофизических источников, можно получить прямые экспериментальные указания на геометрию потока нейтрино и количество высвободившейся энергии в источнике.

Нами разрабатывается новая методика поиска совпадений сигналов в LVD с астрофизическими событиями [55]. При анализе экспериментальных данных в детекторе LVD проводился поиск во временной окрестности регистрации активности возможного астрофизического источника нейтрино. В результате проведённого поиска событий-кандидатов регистрации астрофизических нейтрино не обнаружено. В улучшенной методике проводится оценка постоянной составляющей потока фоновых событий и её исключение из анализа. Также применяется методика поиска событий, которая заключается в проведении кластерного анализа экспериментальных данных. Кластерный анализ представляет собой получение всех возможных кластеров заданной множественности и дальнейший их отбор при помощи расчёта их среднего времени образования фоном. Преимущество этой методики состоит в том, что будут обработаны все кластеры заданной множественности (количества событий в кластере) и рассчитаны их длительности. Длительностью кластера является разница во времени регистрации первого и последнего события в кластере. Далее, исходя из значений длительности и множественности, рассчитывается среднее время образования кластера фоном. В результате, можно проводится отбор кластеров по их среднему времени образования фоном и сопоставить

время регистрации кластеров со временем регистрации активности астрофизических источников. Проводится обработка статистики данных LVD.

11. Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок TAIGA и LHAASO. Измерение потока (или получение ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ

В эксперименте TAIGA были продолжены исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактических локальных источников с помощью узкоугольных атмосферных черенковских телескопах изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA.

В 2025 г. была опубликованы статьи, в которых представлены результаты эксперимента LHAASO по поиску источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Благодаря выдающимся параметрам основной установки LHAASO - Km2A, площадью более 1 кв. км, были открыты ПэВатроны в нашей Галактике, определены их координаты и измерены энергетические спектры излучаемых гамма-квантов. На рисунке 11.1, воспроизводимом из статьи [56], показаны, в качестве примера, параметры источника 1LHAASO J0056+6346u, измеренные двумя установками эксперимента LHAASO: WCDA и Km2A.

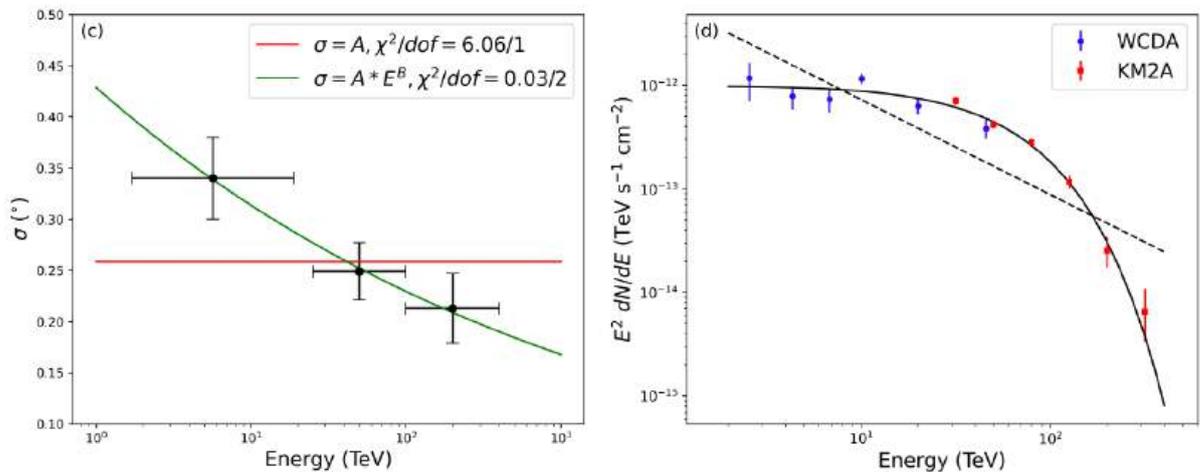


Рисунок 11.1 – Угловой размер и энергетический спектр открытого LHAASO источника гамма-квантов 1LHAASO J0056+6346u

В статьях [56] – [60] опубликованы результаты поисковых исследований других потенциальных источников гамма-лучей высоких энергий: окрестностей пульсаров, остатков сверхновых, гигантских молекулярных облаков, либо других известных астрономам объектов.

12. Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO

В эксперименте LHAASO были также измерены параметры некоторых конкретных гамма-источников (либо возможных источников), а также диффузного гамма-излучения от гигантских молекулярных облаков в ТэВной области энергий. Результаты представлены в статьях [61] – [63]. Так в статье [61] был исследован известный источник, Кассиопея А, представляющий собой молодой остаток сверхновой, который, как предполагается, являются основным источником космических лучей. Показано, что сверхновые такого типа вряд ли могут рассматриваться в качестве основных источников космических лучей. Полученные ограничения показаны на рисунке 12.1, из которого видно, что только крутой спектр в источнике допустим. Так как спектр при распространении в галактике становится еще круче, то он войдет в противоречие с наблюдаемым в этой области энергий.

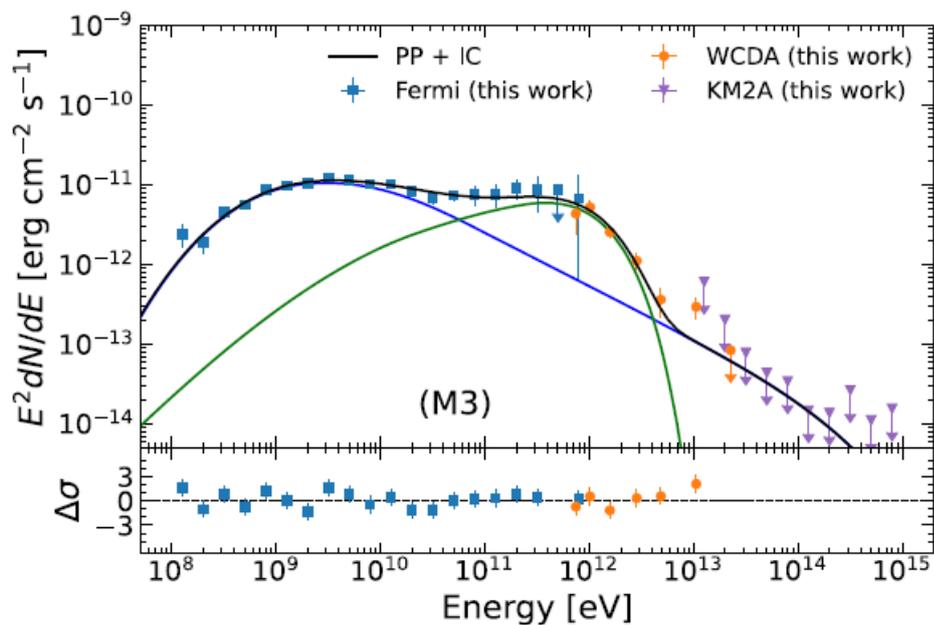


Рисунок 12.1 – Поток гамма-квантов от источника Кассиопея А и их энергетический спектр, измеренный установками Km2A и WCD A

В статье [62] опубликованы результаты по измерению диффузного гамма-излучения от гигантских молекулярных облаков (GMC), а в статье [63] от гипотетических вспышек первичных черных дыр (РНВ), для которых получен лучший в мире верхний предел на уровне $181 \text{ pc}^{-3} \text{ y}^{-1}$ на уровне достоверности 99%.

Продолжаются измерения потока и энергетического спектра гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности телескопами TAIGA-IACT в

моно- и стерео-модях, а также исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от источника Fermi Cygnus Cocoon.

13. Тестовые измерения с первым образцом пропорционального счетчика с катодом из железа

13.1. Подключение счетчика к газо-вакуумной системе и проведение тестовых измерений

Была завершена полная сборка первого пропорционального счетчика. Изначально в качестве анода счетчика запланировано использовать нить из позолоченного вольфрама диаметром 10 мкм. Для первых тестовых измерений в качестве анода использовалась нить из вольфрама диаметром 20 мкм. Счетчик был подключен к газо-вакуумной системе, откачен до вакуума на уровне 10-2 торр и после промывки рабочим газом заполнен аргоном повышенной чистоты (99,998 об. %) до давления 1 атм. Тестирование счетчика, заполненного аргоном указанной чистоты, дало отрицательный результат – в диапазоне анодных напряжений 1...3 кВ спектрометрические импульсы отсутствовали. Вероятной причиной этого являются гасящие примеси в аргоне. Для устранения этой проблемы аргон в пропорциональном счетчике заменен на высокочистую газовую смесь Ar+2 об.% Хе, полученную с помощью системы очистки БНО ИЯИ РАН. Давление рабочего газа составило 735 мм рт.ст.

С целью уменьшения фоновой составляющей при работе счетчика в наземной лаборатории, на поверхности, изготовлена низкофоновая защита из свинцовых кирпичей толщиной 50 мм с замком типа «ласточкин хвост». Собрана газо-вакуумная система для сбора отработанного инертного газа при замене рабочего газа в счетчике. Сбор газа основан на его конденсации с переходом в твердую фазу в специальном баллоне, охлаждаемом жидким азотом.

С помощью гамма-спектрометра измерены уровни радиационной загрязненности всех металлических, полимерных и керамических материалов, входящих в состав счетчика. Существенное превышение фона обнаружено только на керамических токовводах.

13.2. Изучение рабочих характеристик счетчика

Были изучены характеристики счетчика с рабочим газом Ar+2 об.% Хе и определен диапазон его рабочих напряжений. Проведены калибровочные измерения с различными источниками ионизирующего излучения. По результатам тестовых измерений сделан вывод о необходимости дальнейшей оптимизации состава и давления рабочего газа, а также замены действующей анодной нити на анод из позолоченного вольфрама диаметром 10 мкм. Замена анода позволит снизить рабочее напряжение на счетчике, а также улучшить его энергетическое разрешение. Для повышения эффективности регистрации намечено заполнение счетчика криптоном высокой чистоты 6.0 (99,9999%) при давлении 1 атм.

13.3. Изучение резонансного поглощения в изотопе Fe-57

С целью отработки регистрации резонансного поглощения в изотопе Fe-57 собрана экспериментальная установка для изучения эффекта Мёссбауэра, включающая пропорциональный счетчик из кварцевого стекла, источник Co-57, пленку поглотителя, электронный блок регистрации, систему для обеспечения движения источника, а также ПК с платой LAN и соответствующим программным обеспечением.

Работа выполнена в сотрудничестве с Кабардино-Балкарским государственным университетом (г. Нальчик).

14. Развертывание и эксплуатация установки «Ковер-3». Запуск в работу установки «Ковер-3», обеспечение работоспособности установки, проведение набора информации по регистрации кандидатов в фотонные ливни сверхвысокой энергии, поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических источников

В рамках научно-исследовательской работы были выполнены работы, направленные на поддержание работоспособности экспериментальной установки «Ковёр-3», обеспечение стабильного и бесперебойного набора экспериментальных данных, актуальная схема которой показана на рисунке 14.1. Разработана программа моделирования установки в среде GEANT4, необходимая для расчетов параметров эффективности установки и разработки наиболее точных методов реконструкции параметров первичной частицы, родившей широкий атмосферный ливень (ШАЛ).

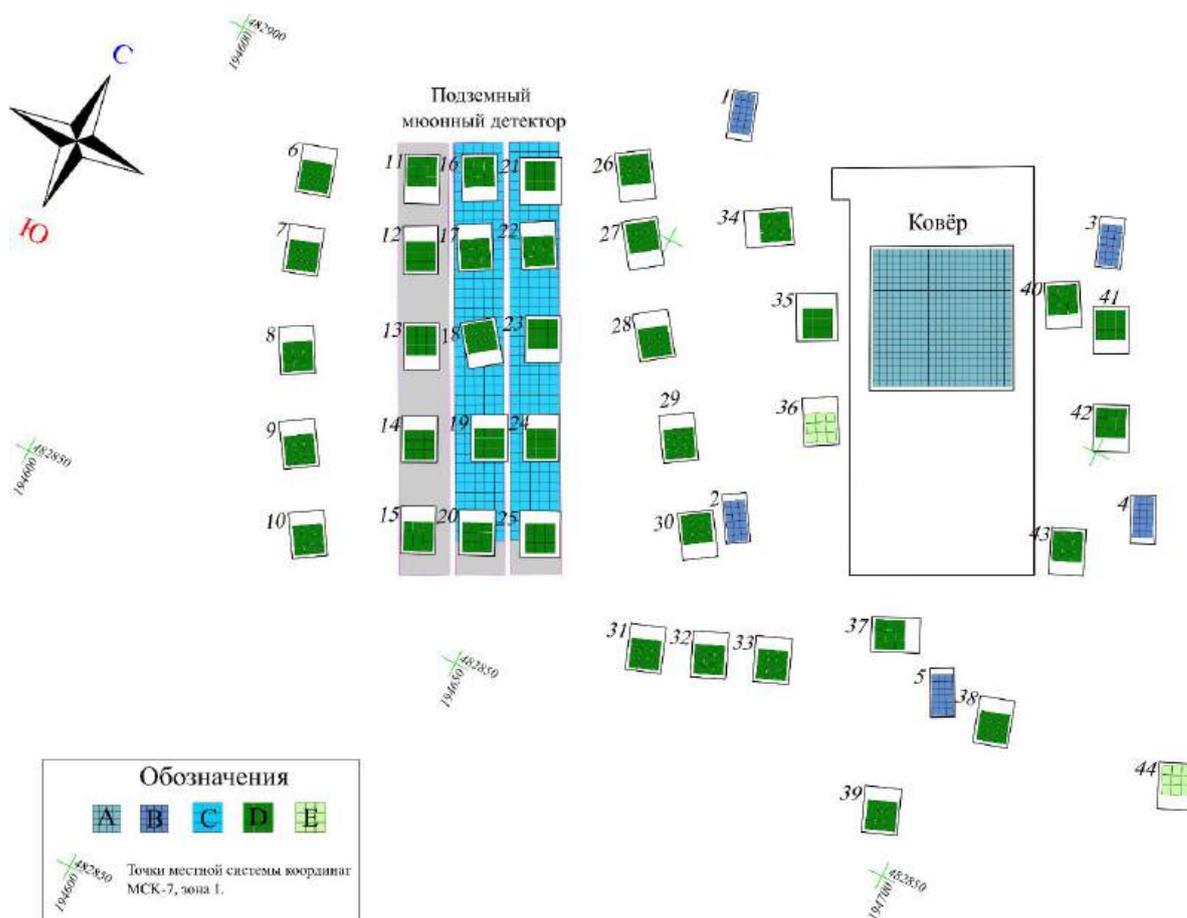


Рисунок 14.1 – Схема установки «Ковер-3» с точной координатной привязкой выносных пунктов регистрации. Обозначения: А – центральная установка «Ковер»; В – старые выносные пункты регистрации на основе жидкого сцинтиллятора; С – сцинтилляционные детекторы, входящие в состав подземного мюонного детектора, общей площадью 410 м²; Д – полностью оснащенные выносные пункты регистрации; Е – пункты регистрации, не оснащенные сцинтилляционными детекторами

В течение 2025 года набора данных выполнялась периодическая диагностика экспериментальных данных на предмет поиска потенциальных неисправностей как в детекторах установки, так и в системах сбора и хранения данных, с целью их своевременного устранения. Данный комплекс мер позволил обеспечить стабильность набора данных, который включает 322 дня набора данных (на 25 ноября 2025 года) из 329 возможных, записанных по стандартному ливневому триггеру установки. Данный набор данных будет использован для реконструкции параметров первичной частицы и дальнейшего анализа, в частности, поиска фотон-подобных событий и их потенциальных астрофизических источников. Также на основе полученного набора данных ведется разработка методов реконструкции параметров первичных частиц с энергией менее 100 ТэВ, что позволит существенно расширить энергетический диапазон установки «Ковёр-3».

Разработана и развивается программа моделирования установки «Ковёр-3», основанная на поэтапных вычислениях в программных пакетах CORSIKA и GEANT4, необходимая для наиболее точной оценки параметров эффективности установки, разработки новых методов реконструкции экспериментальных данных, а также формирования обучающих и тестовых наборов данных для разработки алгоритмов реконструкции и классификации событий с применением нейросетевых методов анализа. Программный пакет CORSIKA использовался для моделирования ШАЛ для трех типов первичных частиц – протоны, ядра гелия и фотоны с энергией более 10 ТэВ, в настоящий момент сгенерировано 1,5 Тб данных ШАЛ. В среде GEANT4 создана подробная модель установки согласно рисунку 1, в частности, наиболее сложным элементом являлось здание, в котором располагается центральный детектор «Ковёр», рисунок 14.2, с бетонной крышей и толщиной около 29 г/см^2 , которая оказывает значительное влияние на функцию пространственного распределения (ФПР) частиц в составе ливня, что усложняет процесс реконструкции параметров первичной частицы. Таким образом подробное моделирование позволит разработать наиболее точные модели реконструкции начиная с малых энергий, алгоритмы отбора фотоподобных событий и расчета эффективностей установки.

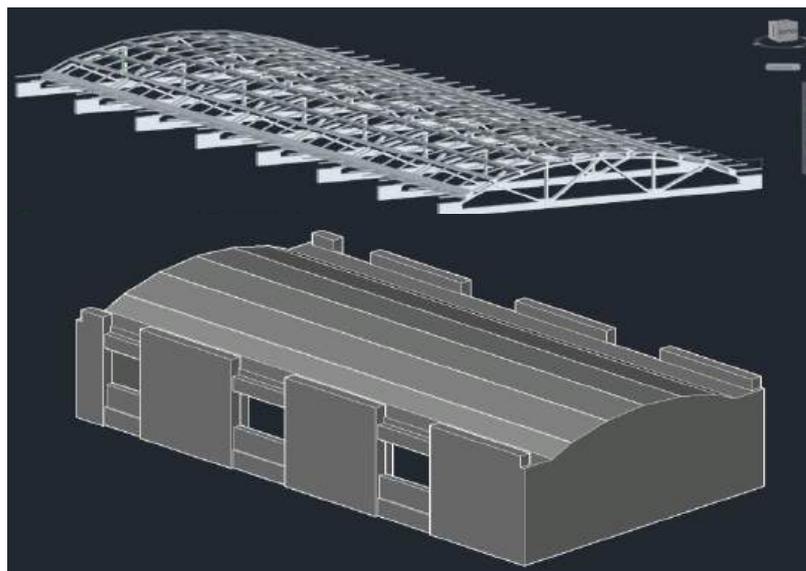


Рисунок 14.2 – Модель центрального здания, в котором расположен детектор «Ковёр»

15. Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO и Telescope Array

15.1. Результаты, полученные на установках TAIGA и LHAASO.

В 2025 г. в статье [64] был опубликован измеренный установкой Km2A методом ШАЛ энергетический спектр протонов космических лучей. Этот результат показан на рисунке 15.1.

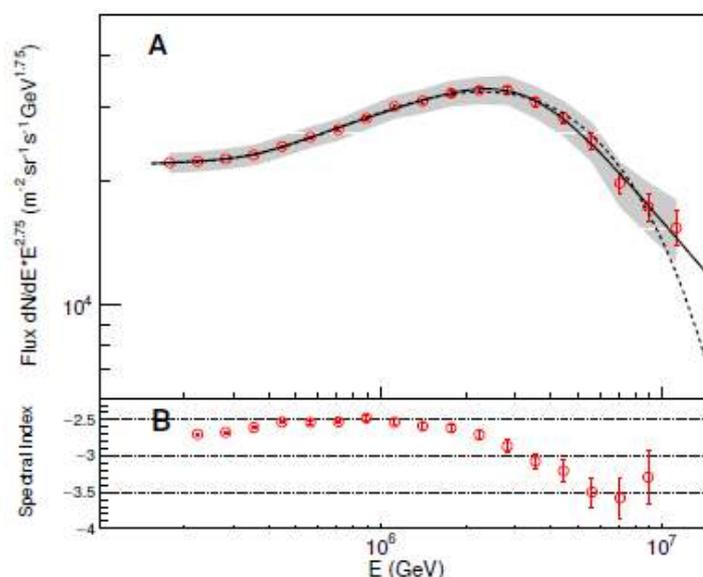


Рисунок 15.1 – Измеренный Km2A методом ШАЛ спектр протонов космических лучей

На установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE эксперимента TAIGA продолжены исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей в области энергий 10^{14} – 10^{18} эВ. Полученные результаты представлены в работах [65, 66].

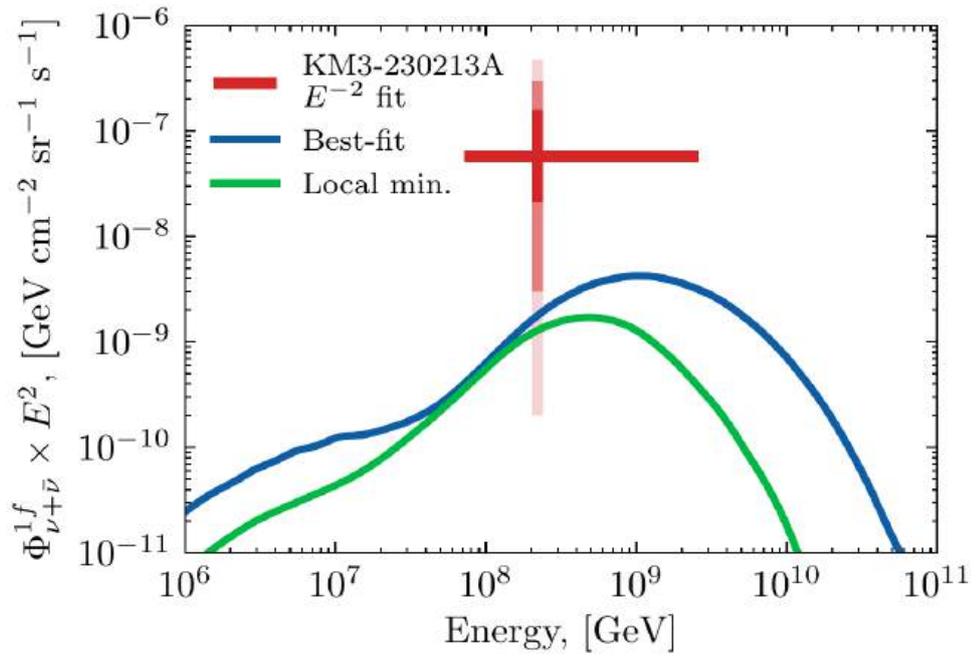
Параллельно ведутся исследования в рамках другой установки в составе LHAASO: ENDA. Две работающие в штатном режиме установки ENDA-LHAASO (одна – прототип ENDA-INR в Москве, другая ENDA-64 в высокогорье) дают непрерывный поток научной информации, которая оперативно анализируется и сравнивается. Проводится сравнение данных, получаемых на установках при существенно различной высоте наблюдения.

В результате исследования протестирован в реальных условиях высокогорья, разработанный нами ранее новый метод регистрации широких атмосферных ливней с помощью эн-детекторов, регистрирующих адронную и электронную компоненты. В отчетном году продолжалась штатная работа установки ENDA-64, что позволит нам в дальнейшем, впервые в мире, измерить спектр космических лучей из области 0,3-30 ПэВ по

адронной (нейтронной) компоненте ШАЛ. Для сравнения измеренных и ожидаемых параметров установок проводится компьютерное Монте-Карло моделирование с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех разновидностей эксперимента с учетом геометрии установки, высоты наблюдения и т. д. Полученные предварительные результаты представлены в статьях [67] – [69].

15.2. Космогенное происхождение нейтрино KM3-230213A

По результатам, полученным на установке Telescope Array (TA), был проведен анализ. Для него были использованы две модели потока КЛУВЭ, описывающие спектр и массовый состав согласно данным TA: наилучшая модель (Best-fit) с преобладанием гелия и локальный минимум (Local min.) с преобладанием протонов и примесью тяжелых ядер. Распространение частиц моделировалось кодом CRPropa 3.2. Рассчитанный поток космогенных нейтрино сравнивался с данными экспериментов путём вычисления ожидаемого числа событий в 90% C.L. энергетическом интервале KM3-230213A (72 ПэВ – 2,6 ЭэВ). Отличие предсказаний обеих моделей от наблюдения KM3NeT составило $\sim 2\sigma$ (см. рисунок 1). Отличие от объединенного наблюдения экспериментами KM3NeT, IceCube, Pierre Auger и Baikal-GVD, оцененное с помощью метода Монте-Карло, также составило $\sim 2\sigma$. Также было показано, что поток каскадных гамма-лучей в рассмотренных моделях КЛУВЭ не противоречит измерениям диффузного гамма-фона Fermi-LAT и пределам на диффузный поток гамма-квантов ультравысоких энергий полученных TA и Pierre Auger, хотя Best-fit модель может быть проверена при увеличении чувствительности этих экспериментов в 3–5 раз.



Красный крест обозначает измерение, полученное только по данным KM3NeT. Вертикальные полосы представляют доверительные интервалы 1σ , 2σ и 3σ для этой оценки. Синяя и зелёная сплошные линии показывают потоки для моделей best-fit и local min., соответственно

Рисунок 15.2 – Поток нейтрино (на один аромат), умноженный на квадрат энергии, в предположении равномерного распределения по трем ароматам.

16. Усовершенствование модели FANSY 2.0/2D с компланарной генерацией частиц в 2D пространстве во взаимодействиях протонов ПКИ при энергиях выше 1 ПэВ

16.1. Необходимость разработки новых моделей

В основных экспериментах на БАК получают информацию, в основном, по характеристикам адронов, генерируемых в центральной кинематической области, которая хотя и отвечает за генерацию мюонной компоненты, всё же играет незначительную роль в развитии ШАЛ. Немного данных о характеристиках нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F (но узких интервалов по поперечному импульсу p_T) можно получать только в эксперименте LHCf. Практически не существует экспериментальной информации по взаимодействиям мезонов при высоких энергиях. Поэтому до настоящего времени существует несколько конкурирующих моделей адрон-ядерных взаимодействий, используемых для моделирования развития ШАЛ в атмосфере для наземных исследований при сверхвысоких энергиях. Разные модели дают, соответственно, и различные предсказания о наблюдаемых характеристиках ШАЛ. Следует отметить, что эти модели воспроизводят генерацию только, преимущественно, стабильных адронов. Это, тем самым, упрощает задачу, но подавляет возможные корреляционные эффекты. Кроме того, в этих моделях довольно редко учитывается рождение мезонных резонансов, которые дают, например, некий вклад и в прямую генерацию мюонов, и в корреляции частиц.

Наконец, остаётся актуальной проблема разработки более детальных моделей генерации вторичных частиц в фрагментационной области при сверхвысоких энергиях, в частности, для изучения т.н. компланарности прихода на детектор наиболее энергетически выделенных частиц (ЭВЧ) в стволах ШАЛ, наблюдавшейся в экспериментах с РЭК при энергиях частиц ПКИ $E_0 \gtrsim n \cdot 10^{15}$ эВ.

16.2. Программный пакет FANSY 2.0

В связи с вышеизложенным продолжалась доводка и отладка программного пакета FANSY 2.0, предназначенного для моделирования взаимодействий адронов при E_0 от $\sim 10^{11}$ до $\sim 10^{20}$ эВ, как в рамках традиционных представлений (FANSY 2.0/QGSJ), так и с учетом компланарной генерации адронов (FANSY 2.0/CPG). В частности, была введена возможность розыгрыша этого процесса в рамках гипотезы о его связи с локальной эволюцией от 3D- к 2D-пространству (FANSY 2.0/2D).

Для решения задачи №2 были уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов ЭВЧ. Была более четко формализована

возможность её розыгрыша в рамках гипотезы о связи компланарности с гипотезой о локальной эволюции сигнатуры метрики пространства ($3D \leftrightarrow 2D$).

17. Моделирование развития стволов ШАЛ от частиц ПКИ на основе пакетов FANSY 2.0 и CORSIKA

17.1. Необходимость изучения фрагментационной области

Основную роль в развитии ШАЛ играют наиболее энергичные частицы каждого взаимодействия ($x_F \approx p/p_0 \gtrsim 0,01$). Но основные эксперименты на БАК (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) информацию, в основном, о характеристиках частиц в центральной кинематической области взаимодействий адронов ($\eta \lesssim 4$). Только эксперимент LHCf даёт информацию о характеристиках нейтральных частиц (n , K , γ) в области больших x_F . Экспериментальные данные по взаимодействиям π и K мезонов вообще получены при низких энергиях ($\sqrt{s} \lesssim 35$ ГэВ).

В стратосферных и высокогорных экспериментах с РЭК была найдена [11] – [14] тенденция к компланарности наиболее энергичных подстволов т.н. гамма-адронных (γ -h) семейств (групп коррелированных частиц наиболее высоких энергий, $E \gtrsim 10$ ТэВ, в стволах ШАЛ), интерпретированная как результат компланарной генерации частиц (КГЧ) именно во фрагментационной области во взаимодействиях частиц ПКИ с энергиями $E_0 \gtrsim 10$ ПэВ.

Идеи, предложенные для объяснения этого явления, разделяются на две принципиально разные группы: *a*) относительно традиционные концепции в рамках адронных взаимодействий, связывающих эффект с образованием лидирующих систем [15] – [18] или с угловым моментом кварк-глюонной струны [19], подразумевающие большие поперечные моменты в плоскости компланарности; *b*) гипотеза, постулирующая локальную $3D \leftrightarrow 2D$ эволюцию размерности пространства на малых масштабах при высоких энергиях [20].

Прямые исследования фрагментационной области при сверхвысоких энергиях в настоящее время возможны только в космических лучах. Подобные эксперименты на коллайдерах невозможно проводить из-за их конструктивных особенностей.

Однако исследования, которые могут дать интересующую нас информацию, возможно проводить в стратосфере и в высокогорье. Для этого следует изучать компланарность т.н. гамма-адронных семейств, т.е. групп генетически связанных частиц высоких энергий ($\gtrsim 10$ ТэВ). Подобные эксперименты проводились в 1970–1990 гг. на высотах 15 г/см² (на аэростатах), 100 г/см² (на сверхзвуковом лайнере «Concorde») и 594 г/см² (на Памире).

Моделирование развития ядерно-электромагнитного каскада в атмосфере после первого взаимодействия частицы ПКИ осуществлялось в рамках модели FANSY 2.0/QGSJ

по алгоритму, использовавшемуся первоначально для модели FANSY 1.0 [70, 71], хорошо зарекомендовавшей себя для объяснения экспериментальных данных Сотрудничества “Памир” [11] – [14], тогда как модели, использовавшиеся пакетом CORSIKA десяток лет назад, давали менее точные предсказания [72]. Кроме того, в рамках пакета CORSIKA аналогичное моделирование было проведено, используя модели QGSJET II-04 и SIBYLL 2.3E. Поскольку, с одной стороны, все теоретические модели связывают явление компланарности с взаимодействиями протонов, а с другой стороны, вклад протонов в образование γ - h семейств на уровне Памира является доминирующим с крутым зенитно-угловым распределением семейств, то на первом этапе моделировались вертикальные ШАЛ от протонов ПКИ с энергией $E_0 \geq 2$ ПэВ с энергетическим порогом для регистрации частиц $E_{thr} = 10$ ТэВ. Записывались только события с суммарной энергией всех частиц, $\Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ. Для дальнейшего анализа отбирались три типа событий, содержащие 1) только электромагнитную ($e-m$) компоненту; 2) только адронную (h) компоненту; 3) сумму электромагнитной и адронной компонент (Sum). Анализируемые события должны удовлетворять условиям $\Sigma E_{e-m} \geq 500$ ТэВ, $\Sigma E_h \geq 500$ ТэВ, $\Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ соответственно.

17.2. Методы анализа азимутальных характеристик событий

За каждым из отобранных по определенным критериям событием стоит своя история пробега в атмосфере до первого взаимодействия частицы ПКИ, характеристик этого взаимодействия, а также самые разнообразные флуктуации развития ШАЛ. В некоторых ливнях первое взаимодействие происходит на небольшой глубине в атмосфере. В этом случае регистрируемые семейства, как правило, выглядят широкими, имеют в своем составе как отдельные частицы, так и узкие подгруппы генетически связанных частиц, родившихся после взаимодействий частиц ШАЛ на различных глубинах. При этом частицы и/или подгруппы образуют треки на относительно большом расстоянии друг от друга. Другая крайность – проскок первичной частицы глубоко в атмосферу и её взаимодействие на небольшой высоте над детектором. В этом случае событие выглядит узким, содержит частицы с очень высокими энергиями, а их треки находятся недалеко друг от друга. Но в любом случае все семейства несут информацию о предыдущих стадиях развития ШАЛ.

Процедура «Декаскадирования». Для снижения влияния узких подгрупп, как правило, обладающих осевой симметрией и состоящих из γ -квантов и e^\pm , родившихся в результате развития электромагнитных каскадов от γ -квантов, была предложена процедура так называемого «декаскадирования» (см., например, [73]). Смысл этой процедуры – объединение частиц в каждой из подобных подгрупп в некий условный “объект”, близкий по энергии и импульсу к своей частице-предку.

Для этого используется параметр $Z_{ik} = R_{ik} (1/E_i + 1/E_k)^{-1}$, который вычисляется для пары частиц (i -й и k -й в этом примере). Здесь R_{ik} – расстояние между “частицами”, E_i и E_k – их энергии. Физический смысл процедуры в том, что для двух частиц, родившихся в одном взаимодействии с взаимным поперечным импульсом p_t и пролетевших расстояние H , параметр $Z_{ik} = p_t \cdot H$. При наличии каскадных процессов ситуация немного усложняется, но физический смысл остается тем же. Очевидно, что величины эффективных поперечных импульсов в электромагнитных и ядерных каскадах различаются в несколько раз. Объединение частиц с малыми взаимными значениями Z_{ik} указывает, как правило, на гамма-квант, породивший эти частицы. Объединение частиц, чьи взаимные значения Z_{ik} на порядок больше, как правило, дает информацию об адронном взаимодействии, породившем эти частицы. Из-за сильных флуктуаций в развитии ШАЛ эффективные значения Z_{ik} для каждого индивидуального события могут существенно отличаться от соответствующих значений для других событий.

Пространственное разрешение в экспериментах с РЭК составляет не более 1 мм, что позволяет регистрировать отдельные частицы. Поэтому при моделировании поверхность детектора была разбита на квадратные ячейки со сторонами $\Delta_{x,y} = 1$ мм. В основном частицы попадают в различные ячейки.

Процедура “декаскадирования” частиц, т.е. их объединения в более крупные условные “объекты” (далее будем иногда применять термин “поток энергии”), в данной работе реализуется следующим образом.

Определяется так называемый параметр декаскадирования Z_C , применяемый для объединения “объектов”, удовлетворяющих условию $Z_{ik} < Z_C$. Поскольку в любом событии предыдущая история развития ливня неизвестна, предлагается рассматривать процедуру “декаскадирования” для каждого из событий в широком диапазоне значений Z_C . В данной работе значение Z_C варьируется от 0 до 2500 ТэВ см. Расчеты показывают, что подобный диапазон охватывает практически весь диапазон флуктуаций развития ШАЛ, инициированных протонами ПКИ, при $E_{thr} = 10$ ТэВ.

Эффективные значения Z_C зависят от условий эксперимента (высота наблюдения, пороги регистрации и т.д.). Но в любом случае они определяются зависимостью от $p_t \cdot H$. Говоря очень упрощенно, при увеличении значения Z_C мы как бы двигаемся от уровня наблюдения к началу каскада, т.е. к первому взаимодействию частицы ПКИ.

«Декаскадирование» начинается с выстраивания всех «объектов» события в порядке уменьшения энергии. Выбираем «объект» с наименьшей энергией (это будет, допустим, i -я

частица). После этого перебираем все парные сочетания i -й частицы с k -й, l -й, m -й... (и т.д.) частицами. Для каждой пары «объектов» (для i -го и k -го, например) вычисляется параметр Z_{ik} . Если $Z_{ik} < Z_C$, и при этом это значение является наименьшим из всех рассмотренных сочетаний, то i -я и k -я «объекты» объединяются в новый виртуальный «объект» с энергией $E^* = E_i + E_k$ и координатами $x^* = (x_i \cdot E_i + x_k \cdot E_k) / E^*$ и $y^* = (y_i \cdot E_i + y_k \cdot E_k) / E^*$. Затем процедура повторяется, т.е. все «объекты» события вновь выстраиваются в порядке уменьшения энергии, после чего выбирается «объект» с наименьшей энергией, для которой перебираются все парные сочетания с другими частицами, и так далее.

При каждом значении Z_C для 4-х, 6-ти, 8-ми наиболее энергичных объектов события вычисляются значения $\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8$. Для стратосферных событий вычисляются также значения λ_{34} . В результате для каждого события получаем набор значений для каждого из параметров $\lambda_4(Z_C), \lambda_6(Z_C), \lambda_8(Z_C)$ и выбираем максимальные значения, характеризующие данное событие. Используя выбранные значения для каждого из событий, для всего набора событий строится распределение вероятности наблюдения выстроенных.

Определение степени компланарности события. Для анализа выстроенности N точек на плоскости мы используем параметр $\lambda_N = \sum_{i \neq j \neq k}^N \cos 2\varphi_{ij}^k / [N(N-1)(N-2)]$ [11], который изменяется от $\lambda_N = 1$ (для N точек, расположенных на прямой линии) до $\lambda_N \approx -1/(N-1)$ (в околоизотропных случаях). Здесь φ_{ij}^k – угол между векторами, выходящими из k -й точки в i -ю и j -ю точки. Для вычисления λ_N перебираются все комбинации частиц, т.е. каждая частица в какой-то момент выполняет роль k -й частицы, а других случаях – роли i -й и j -й частиц. Будем называть семейства компланарными (или выстроенными), если удовлетворяется условие $\lambda_N \geq \lambda_{\text{сop1}}$ для N наиболее энергичных объектов, входящих в их состав. В основном используются значения $N = 4, 6$ и 8 при $\lambda_{\text{сop1}} = 0,8, 0,90$ и $0,95$.

Подобный подход предложен впервые.

18. Исследование азимутальных характеристик наиболее энергичных потоков в стволах ШАЛ

18.1. Основные критерии моделирования ШАЛ

Для моделирования ШАЛ и отбора событий для дальнейшего анализа использовались следующие критерии.

- Спектр по энергии вертикальных протонов разыгрывался при $E_0 \geq 2$ ПэВ ($2 \cdot 10^{15}$ эВ).
- Порог прослеживания каскадных частиц $E_{thr} = 10$ ТэВ.
- В банк событий на уровне наблюдения записывались события с суммарной энергией всех частиц (γ, e^\pm, h) $\Sigma E_{Sum} \geq 500$ TeV с энергией $E \geq E_{thr}$.

Отклик детектора не рассматривается. Цель расчетов – понять, отражаются ли вообще на характеристиках высокоэнергичных частиц в стволах ШАЛ физические эффекты, связанные с различием параметров взаимодействий в версиях FANSY 2.0

Для вычисления флуктуационного фона компланарных событий использовались модель FANSY 2.0/QGSJ, а также модели пакета CORSIKA (QGSJET II-04 и SYBILL 2.3E). Для моделирования событий, получаемых для рассмотрения влияния процесса КГЧ, использовалась модель FANSY 2.0/2D.

18.2. Моделирование характеристик ШАЛ в рамках традиционных моделей

Пакет CORSIKA включает несколько моделей взаимодействий адронов с ядрами атомов воздуха. Модели QGSJET II-04 и SYBILL 2.3E (как и FANSY 2.0/QGSJ) можно назвать традиционными (т.е. моделями, в которых отсутствует компланарная генерация частиц), но противоположными по многим параметрам. Поскольку при анализе проблемы компланарности встает вопрос о фоне, создаваемого флуктуациями развития ШАЛ, для решения этой проблемы в рамках моделей QGSJET II-04 и SYBILL 2.3E (а также FANSY 2.0/QGSJ), были наиграны события по одинаковым критериям, описанными в разделе 18.1.

На рисунке 18.1 показаны вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,80$) семейства для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубине 15 г/см² в атмосфере. Можно видеть, что значения вероятности наблюдения компланарных событий для $N=4$ ($\lambda_4 \geq 0,80$) для суммарной (Sum) компоненты во всех трёх моделях одинаково. Небольшие отличия вероятностей для электромагнитной ($e-m$) и адронной (h) компонент объясняются имеющимися различиями в сечениях взаимодействующих адронов, что ведет к немного разному перераспределению энергии между этими компонентами.

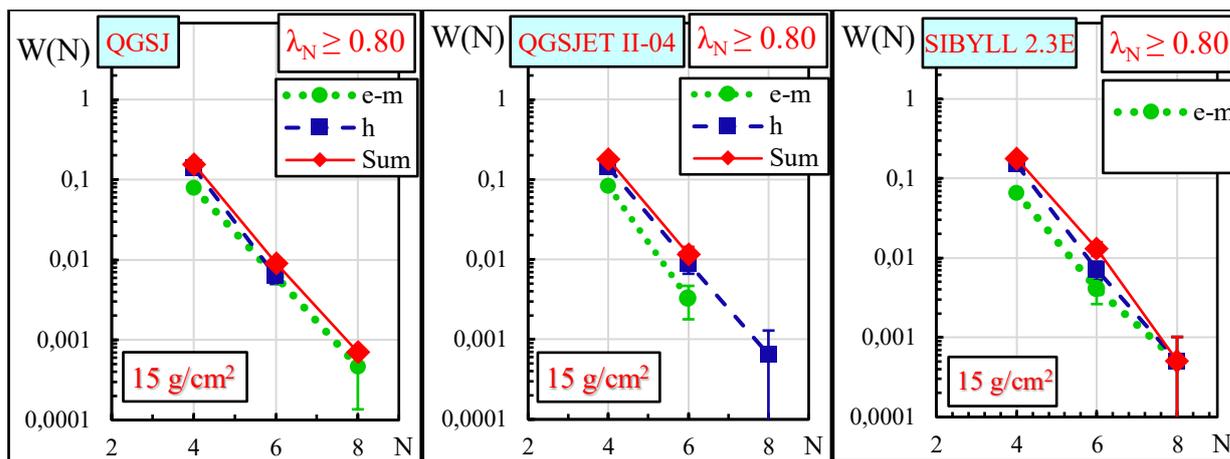


Рисунок 18.1 – Вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубине 15 г/см^2 в атмосфере, предсказываемые моделями FANSY 2.0/QGSJ, QGSJET II-04 и SYBILL 2.3E

На рисунке 18.2 показаны вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для суммарной (Sum) компоненты с энергией $\Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубинах 15, 100, 600 г/см^2 в атмосфере. Можно видеть, что вероятности наблюдения компланарных событий для $N=4$ ($\lambda_4 \geq 0,80$) для суммарной Sum ($\gamma+e^\pm+h$) компоненты во всех трёх традиционных моделях на трёх глубинах в атмосфере одинаковы. При увеличении значения N статистические ошибки быстро растут, но значения, предсказываемые разными моделями, совпадают в пределах ошибок. Таким образом, для анализа влияния флуктуаций на наблюдаемую компланарность событий достаточно ограничиться одной традиционной моделью, если рассматривать суммарную (Sum) компоненту.

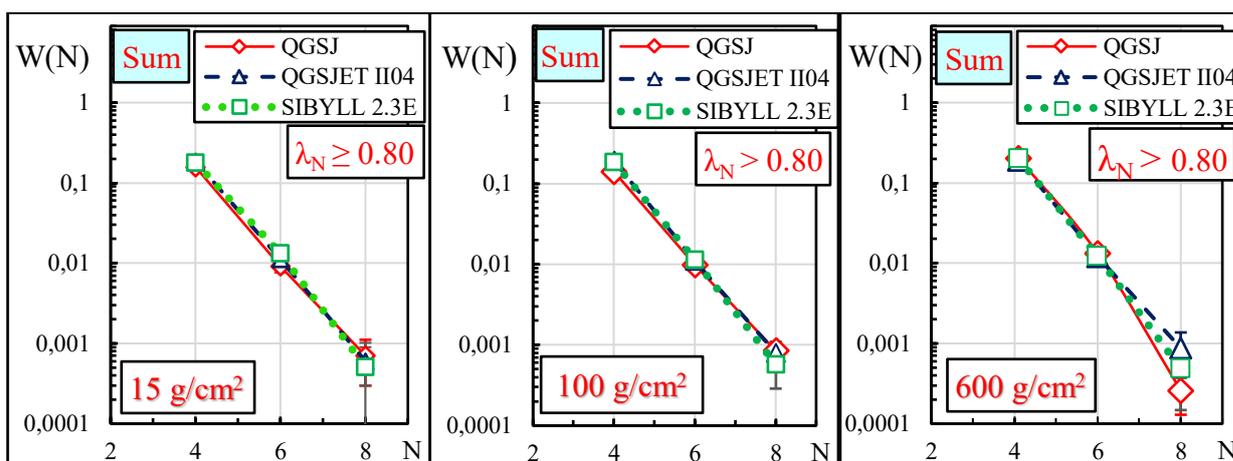


Рисунок 18.2 – Вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для суммарной (Sum) компоненты с энергией $\Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубинах 15, 100, 600 г/см^2 в атмосфере

18.3. Азимутальные характеристики ШАЛ в версиях QGSJ и 2D модели FANSY 2.0

Глубина 15 г/см^2 в атмосфере. На рисунке 18.3 показаны вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500 \text{ ТэВ}$ на глубине 15 г/см^2 в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и версией FANSY 2.0/2D с компланарной генерацией частиц (КГЧ). Можно видеть существенное различие предсказаний для всех компонент.

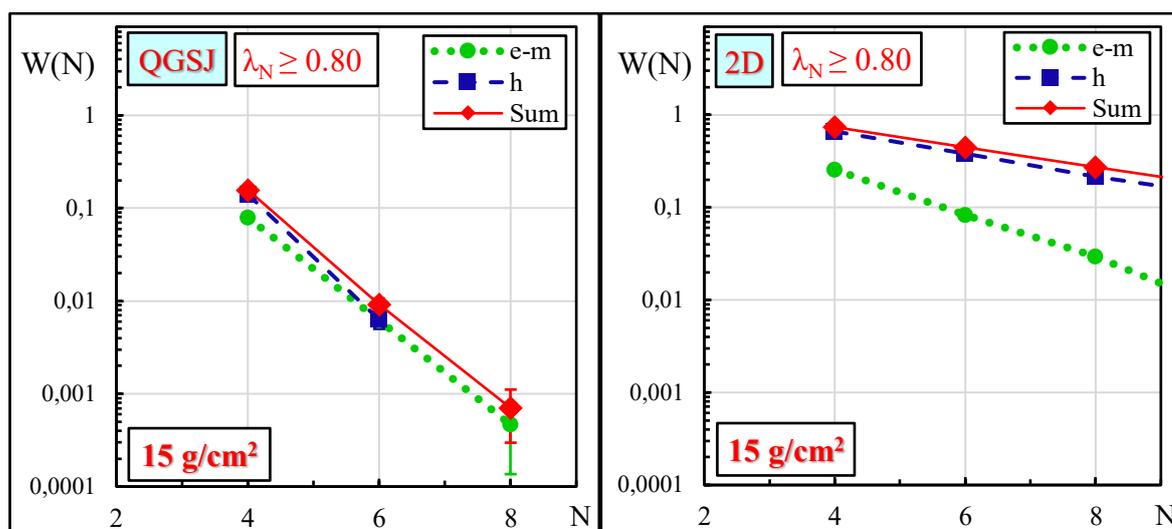


Рисунок 18.3 – Вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500 \text{ ТэВ}$ на глубине 15 г/см^2 в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D

На рисунке 18.4 показано экспериментальное компланарное ($\lambda_4 = 0,99$) адронное семейство «Страна» (единственное событие с энергией $\Sigma E_{Sum} \geq 1000 \text{ ТэВ}$, зарегистрированное в стратосферном эксперименте) [13]. Также приведена расчетная вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,99$) адронных событий в модели FANSY 2.0/2D, которая на два порядка ниже экспериментально значения. Отметим, что в рамках традиционной модели FANSY 2.0/QGSJ вообще не получены события с $\lambda_4 \geq 0,99$ на статистике ~ 10 тыс. семейств.

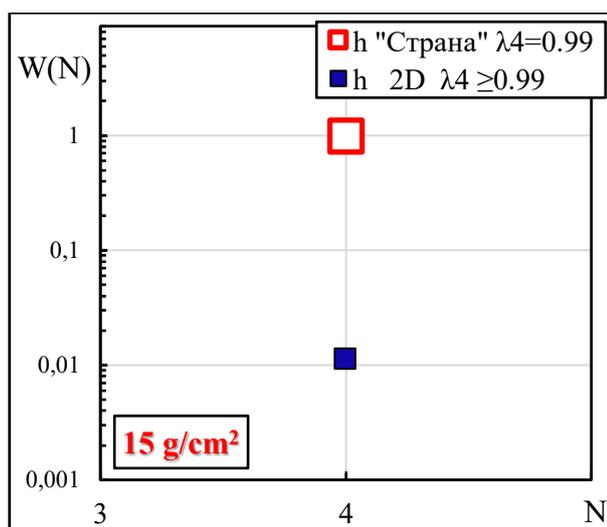


Рисунок 18.4 – Экспериментальное компланарное ($\lambda_4 = 0,99$) адронное семейство «Страна» (единственное событие с энергией $\Sigma E_{Sum} \geq 1000$ ТэВ, зарегистрированное в стратосферном эксперименте), и вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,99$) адронных событий в модели FANSY 2.0/2D

Глубина 100 г/см² в атмосфере. На рисунке 18.5 показаны вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубине 100 г/см² в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D. Можно видеть существенное различие предсказаний для всех компонент, хотя оно немного меньше, чем на глубине 15 г/см².

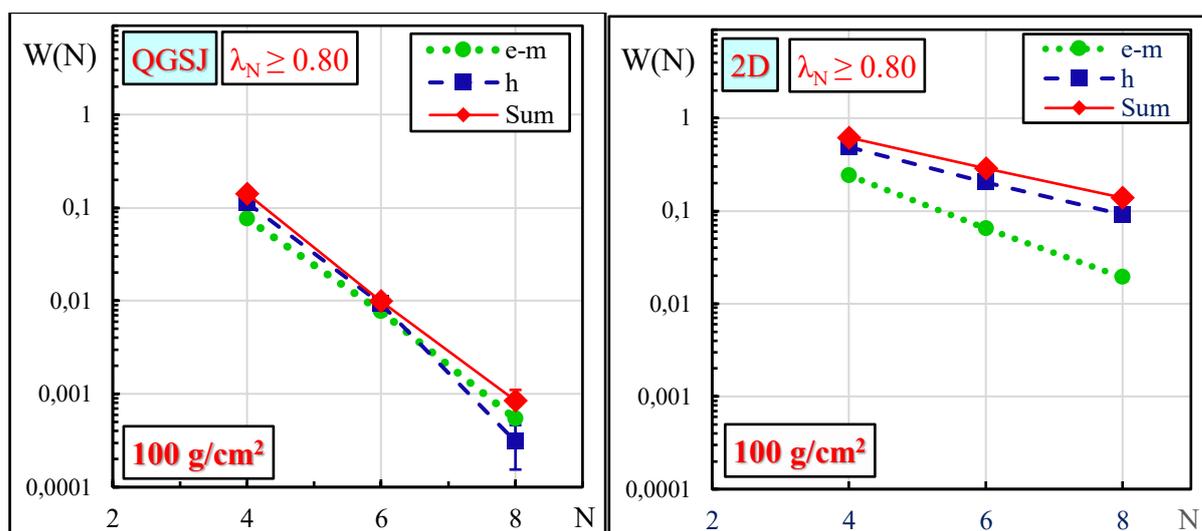
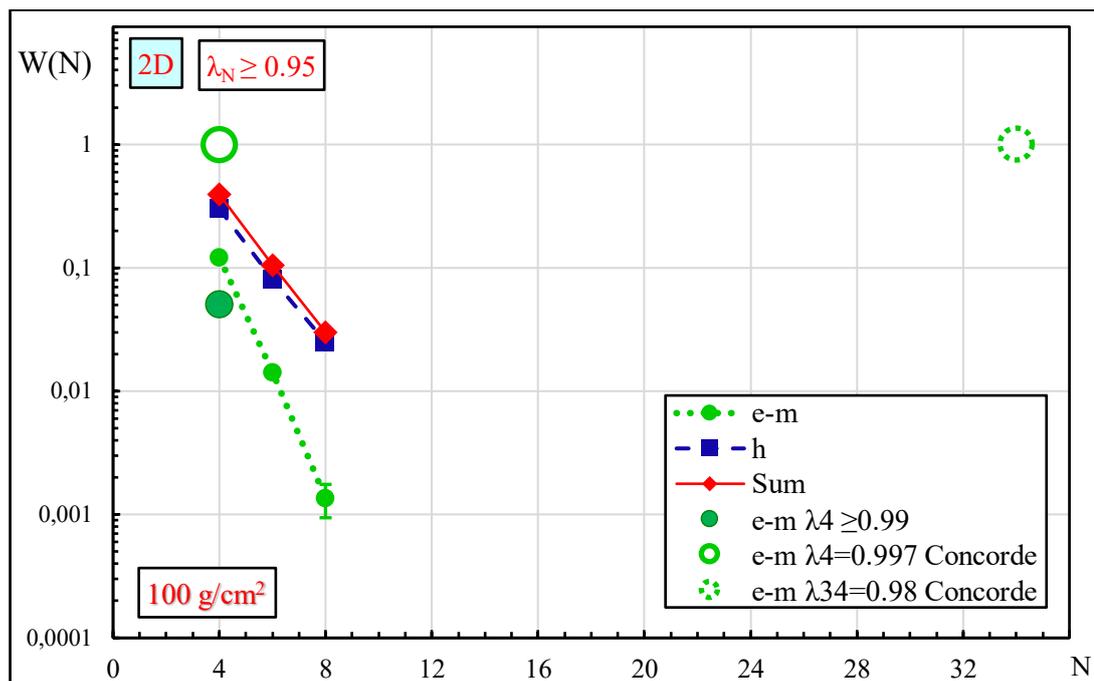


Рисунок 18.5 – Вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубине 100 г/см² в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D

На рисунке 18.6 зелеными пустыми кружками (соответственно, непрерывная и прерывистая линии, $\lambda_4 = 0,997$, $\lambda_{34} = 0,98$) показано экспериментальное компланарное электромагнитное ($e-m$) семейство «Concorde» (единственное событие с энергией $\Sigma E_{Sum} \geq 1000$ ТэВ, зарегистрированное в эксперименте на сверхзвуковом лайнере «Concorde») [14]. Также приведена расчетная вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,95$) событий для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент в модели FANSY 2.0/2D. Кроме того, рассчитана вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,99$) электромагнитных событий в модели FANSY 2.0/2D, которая на ~полтора порядка ниже экспериментального значения семейства «Concorde» ($\lambda_4 = 0,997$). Если рассчитать вероятность регистрации события с значением параметра $\lambda_4 \geq 0,997$ в модели FANSY 2.0/2D, то полученное значение опустится еще на один – два порядка. Отметим, что в рамках традиционной модели FANSY 2.0/QGSJ вообще не получены события с $\lambda_4 \geq 0,99$ на статистике ~10 тыс. семейств. Символ, обозначающий степень компланарности 34 частиц ($\lambda_{34} = 0,98$), вообще не может быть объяснен даже в рамках модели FANSY 2.0/2D.



Зеленые пустые кружки (непрерывная и прерывистая линии) обозначают экспериментальное компланарное ($\lambda_4 = 0,997$ и $\lambda_{34} = 0,98$, соответственно) электромагнитное ($e-m$) семейство «Concorde». Также приведена расчетная вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,95$) событий для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент в модели FANSY 2.0/2D. Сплошной большой зеленый кружок обозначает рассчитаную вероятность наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,99$) электромагнитных событий в модели FANSY 2.0/2D

Рисунок 18.6 – Электромагнитное компланарное семейство «Concorde» и расчетная вероятность наблюдения компланарных событий.

Глубина 600 г/см² в атмосфере. На рисунке 18.7 показаны расчетные вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ на глубине 600 г/см² в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D. Можно видеть, что различия предсказаний этих двух моделей существенно меньше, чем на высотах 15 и 100 г/см².

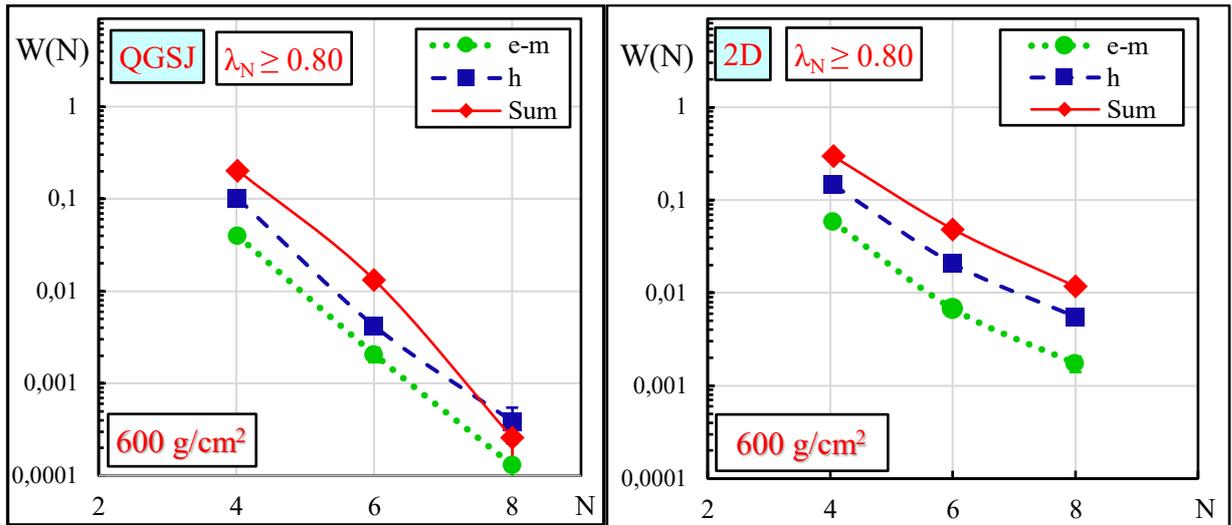
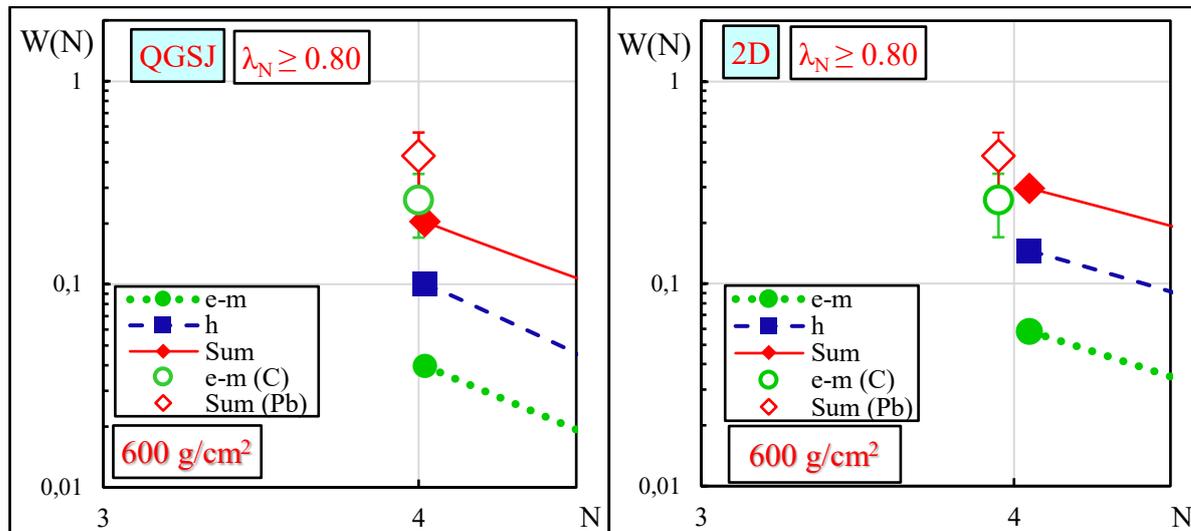


Рисунок 18.7 – Вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4, \lambda_6, \lambda_8 \geq 0,80$) семейств с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент на глубине 600 г/см² в атмосфере, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D

На рисунке 18.8 показаны расчетные вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_4 \geq 0,80$) семейств для электромагнитной ($e-m$), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ, предсказываемые традиционной версией FANSY 2.0/QGSJ и КГЧ-версией FANSY 2.0/2D на глубине 600 г/см² в атмосфере. Можно видеть, что различия предсказаний этих двух моделей существенно меньше, чем на высотах 15 и 100 г/см².

На рисунке 18.8 также отложены экспериментальные точки, полученные Сотрудничеством «Памир» [11]. Зеленый пустой кружок и красный пустой ромб, обозначенный как $e-m$ (C) и Sum (Pb), показывают результаты, полученные, соответственно в т.н. «углеродных» камерах и «свинцовых». Соответственно, их можно считать относящимися к $e-m$ - и Sum -компонентам. Можно видеть, что имеются существенные

различия между результатами моделирования и экспериментальными точками, хотя они и не так ярко выражены, как стратосферные результаты.



Зеленый пустой кружок и красный пустой ромб, обозначенный как e-m (C) и Sum (Pb), показывают экспериментальные результаты Сотрудничества «Памир»
 Рисунок 18.8 – Расчетные вероятности наблюдения компланарных ($\lambda_N \geq 0,80$) семейств для электромагнитной (e-m), адронной (h), суммарной (Sum) компонент с энергией $\Sigma E_{e-m}, \Sigma E_h, \Sigma E_{Sum} \geq 500$ ТэВ, предсказываемые версиями FANSY 2.0/QGSJ и FANSY 2.0/2D на глубине 600 г/см^2 в атмосфере.

Следует учесть следующие факторы.

- 1) Результаты моделирования не учитывают отклик РЭК. В результате учета процессов регистрации расчетные точки могут сместиться вниз.
- 2) Использование для анализа экспериментальных событий метода, предложенного в данной работе, может сместить экспериментальные точки вверх.
- 3) В результате расхождение экспериментальных и расчетных точек может увеличиться.

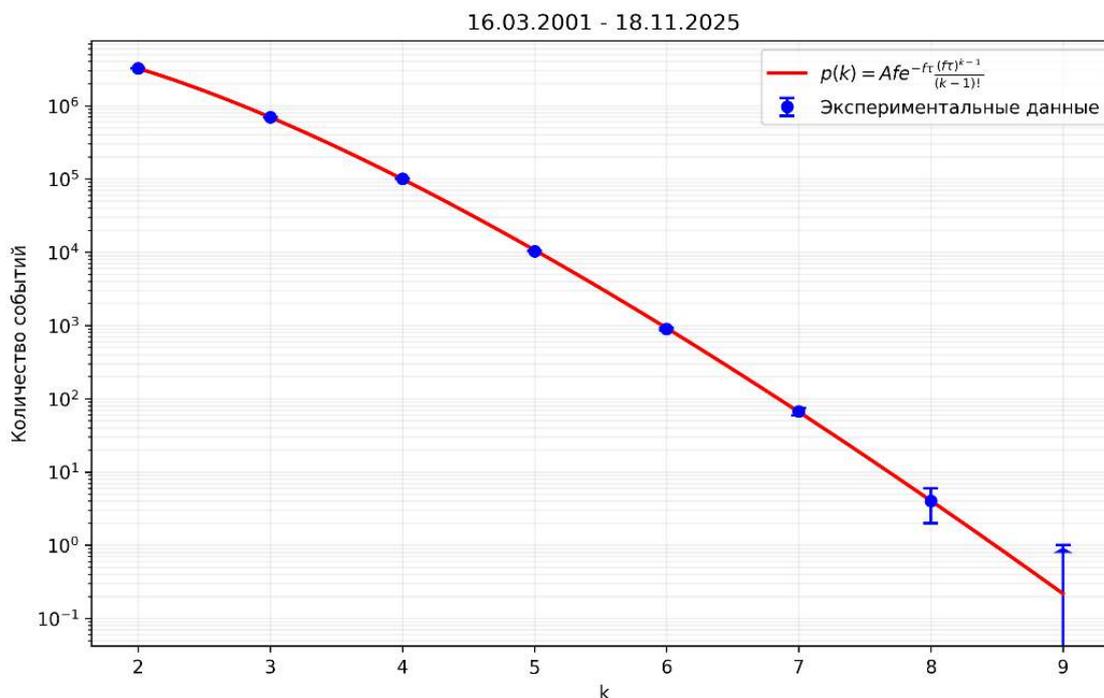
В целом можно сделать вывод, что имеющиеся модели неспособны объяснить имеющийся набор экспериментальных данных по компланарности наиболее высокоэнергичных потоков энергии в стволах ШАЛ.

19. Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации нейтринных вспышек от взрывов сверхновых звёзд с коллапсом ядра, мониторингирование потоков нейтрино от коллапсирующих звезд и поиск редких нейтринных событий от Галактических источников

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. За 2025 год программами диагностики неисправностей было выявлено 92 счетчика с отклонениями от нормального режима работы. Из них 30 потребовали ремонта электронных плат, 1 – замены фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), 7 – смены оптической смазки без замены ФЭУ, 6 – очистки поверхности ФЭУ. Для всех 92 счетчиков была проведена настройка усиления ФЭУ и порога регистрации импульсного преобразователя. Проводился ремонт электроники системы регистрации БПСТ, в том числе ремонт кассет годоскопа импульсных каналов 5 раз и ремонт кассет годоскопа амплитудных каналов 3 раза.

По информации БПСТ за 2025 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, время набора информации на 18.11.2025 (run r1749081) составило 307 суток – 98,0 % от календарного времени за период с 01 января 2025 по 18 ноября 2025 года. Эффективное время набора данных по данной задаче составило 301,8 суток.

Проведена обработка всей набранной в 2024 году информации, обработано 445531000 событий. Из этих событий отобраны 3499500 одиночных срабатываний счётчиков внутренних (детектор Д1 = 515444) и внешних (детектор Д2 = 2984060) плоскостей БПСТ. Критерии отбора позволяют выявлять нештатную работу установки и избегать создания ложных сигналов о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер сигналов от нейтрино не обнаружено. Полученное за 2001 – 2025 годы экспериментальное распределение фоновых событий по множественности в скользящем временном окне, равном 20 секундам, представленное на рисунке 19.1, при сравнении с расчетом указывает на отсутствие претендентов на кластер сигналов от нейтрино. Чистое время набора за время работы детектора с 06.03.2001 по 18.11.2025 составляет 21,3 года.



Распределение аппроксимировано функцией Пуассона. Значение параметра $f_1 = 0,016$ соответствует частоте фоновых событий в детекторе D1
 Рисунок 19.1 – Распределение одиночных событий по кратностям в пределах скользящего 20 сек интервала

Для поиска возможной генетической связи последующих одиночных событий с предшествующим каскадом при обработке в обязательном порядке проверяется предыстория каждого одиночного события в D1. Каскадом считается любое событие, в котором есть сработавший время-амплитудный логарифмический преобразователь (порог 500 МэВ) на внутренней горизонтальной плоскости установки. Проверка проводится для интервала 2 секунды между каскадом (энерговыведение хотя бы в одном счётчике на плоскости 6,7,8 более 500 МэВ) и одиночным событием на 6, 7 или 8 плоскости.

В 2025 году зарегистрировано 367 кластеров в детекторе D1 множественности $m_1 > 4$. После детальной проверки каждого кластера установлено, что ни одного кластера с множественностью $m_1 > 4$, который можно связать с каскадами, не зарегистрировано. Таким образом, в 2025 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности $m \geq 5$, то есть ложный алерт для регистрации вспышки Сверхновой по этой причине исключен. Критерии отбора событий позволяют контролировать работу установки и избегать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2025 года не было обнаружено.

За весь период наблюдения, с 30.07.1980 по 18.11.2025, чистое время набора составило 38,9 лет. Из них 21,3 года набрано после 06.03.2001 года, после запуска системы сбора данных с управляющим триггером от любого сработавшего счетчика. Получено новое верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в галактике на 90% уровне достоверности: $f_{\text{col}} < 0,059 \text{ год}^{-1}$

20. Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ по нейтринной задаче и контроля экспериментальных данных БПСТ. За период с 01.01.2025 по 24.11.2025 время набора информации по нейтринной задаче составило 7653,6 часа, (318,9 суток, 97% от календарного времени). Чистое время набора, с учетом мёртвого времени установки, составило 7511,0 часа (313,0 суток).

Проведена обработка информации, полученной за период с 01.01.2025 по 24.11.2025 – всего зарегистрировано 454486904 событий. Из общего потока информации было отобрано 2606 событий, соответствующих формальным критериям для поиска мюонов из нижней полусферы, заложенным в программы обработки. Затем к этим событиям была применена ручная обработка. Оценивались энерговыделения и времена появления сигналов на плоскостях, длины траекторий мюонов в установке, формы импульсов. В 2025 году (до 24 ноября) на БПСТ зарегистрировано 26 событий, прошедших по критериям для мюона из нижней полусферы. За весь период наблюдения с декабря 1978 года по 24.11.2025 чистое время наблюдения составило 341596,4 часов (39,0 года). Всего с декабря 1978 года на БПСТ зарегистрировано 2019 событий.

В рамках поиска астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино в 2025 году проводилось сопоставление данных БПСТ с различными типами астрофизических транзиентов, сообщения о которых появлялись на платформе The General Coordinates Network (GCN). Был проведен поиск совпадений с событиями от следующих установок: LIGO-Virgo-KAGRA (2473 события), Fermi Gamma-ray Space Telescope (1084 события), Neil Gehrels Swift Observatory (67 событий), INTEGRAL (28 событий, завершил работу 28.02.2025), IceCube (24 события). Поиск проводился в интервале ± 500 секунд между событиями. За период с 01.01.2025 по 24.11.2025 было обнаружено 4 пересечения по времени: с тремя кандидатами на гравитационные волны от установок LIGO/Virgo/KAGRA и одним гамма-всплеском, зарегистрированным инструментом Fermi-GBM. Из числа этих пересечений обнаружено два совпадения по координатам с пятнами локализации гравитационных волн (события S251109o и S250910co). Оба гравитационно-волновых события являются кандидатами с низкой значимостью.

21. Результаты исследования корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов

21.1. Анализ экспериментального материала

Учитывая возможность формирования сейсмогенного поля по всей области Кавказа, для исследуемого события 01-02.09.2019 были привлечены к анализу данные спутниковых снимков [74], характеризующих погоду, и данные расположения активных разломов на всём Кавказе (AFEAD) [75], определяющих выход флюидов из верхней мантии. Данные сравнивались, с вариациями геофизических параметров в Приэльбрусье, измеряемых на установке «Ковёр». Выделялись события, связанные в пространстве и во времени. Ниже приводится описание событий, произошедших в Закавказье, в наиболее значимые моменты динамики возмущений параметров, измеренных установкой, в период с 17:00 1-го по 05:00 2-го сентября 2019, Данные опубликованы в работах [29, 30]. Для демонстрации, каждое описание сопровождается рисунком. На нём, справа вверху (*i*), карта распределения облачности по высоте, усреднённой за 15 минут, соответствующая конкретному моменту. Данные получены с ресурса [74] для Грузии. Размер её области: 700x550 км². Тёмно-синий цвет отвечает облачности на высоте около 8 км, облака серого оттенка – ниже. Голубой – 10 км, жёлтый – 12 км. Жёлтым кружком обозначено расположение установки «Ковёр». Пунктирной линией обозначен магнитный меридиан, проходящий через неё. Жёлтым квадратом отмечен город Ереван. Справа внизу (*j*) та же карта, совмещённая с картой разломов с ресурса [75]. На рисунке слева, на панелях, приводится динамика измеренных геофизических величин в течении всего исследуемого периода с отметкой времени описываемого момента. На панелях представлены: *a*) электрическое приземное поле; *b*) ток растекания в грунт электрического заряда реки на длине погонного метра; *c*) задержка радиосигнала точного времени спутников *GPS*. Коэффициент пересчёта в ПЭС: $5.235 \cdot (1 \pm 0,19) \text{ нс} \cdot \text{TECU}^{-1}$; *d*) рассчитанная по вариациям регистрируемой мюонной интенсивности оценка средней разности потенциалов в тропосфере над периферийной областью окружения установки в удалении от 10 до 30 км [76]; *e*) рассчитанная по вариациям мюонной интенсивности оценка разности потенциалов в тропосфере над установкой, усреднённая в радиусе 5 км [26, 28]; *f*) яркость свечения неба в относительных единицах, измеренная в районе установки «Ковёр» в южном направлении в диапазоне 25° – 70° от зенита, описание в [76, 77]. Вычтен фон рассеяния от небольшой облачности, непрерывно спадающий во времени; *g*) *Y*-компонента дипольного поля Земли (*SYM-D* индекс) [78]; *h*) *X*-

компонента дипольного поля Земли (*SYM-H* индекс) [78]. Везде далее, где специально не указано, приводится местное время (*LT*), опережающее мировое (*UT*) на 3 часа.

18:00 01.09.2019 (рисунок 21.1). В Приэльбрусье - начало аномального возмущения разности потенциалов в тропосфере и тока растекания заряда реки. Прерывание положительного возмущения ПЭС. В Закавказье сформировалась небольшая активная облачность (высота 8 км) западнее магнитного меридиана на развилке шовной зоны Измир–Анкара–Эрзинджан. В последующее время облако растёт и расширяется, двигаясь на восток между южной и северной (Севано-Акеринской сутурой) ветвями шовной зоны в сторону Армянского нагорья. Периодически имеют место положительные возмущения ПЭС при западном расположении облака относительно магнитного меридиана.

21:15 01.09.2019 (рисунок 21.2). В Приэльбрусье, на «периферии», имел место импульсный скачок разности потенциалов в форме разряда. Начало роста положительной разности потенциалов в тропосфере над установкой «Ковёр». Несколько усилилась скорость роста отрицательного тока растекания заряда реки. В Закавказье активная область облака (высота 10 км) охватила всю площадь между ветвями шовной зоны и Ахурянским глубинным разломом.

00:00 02.09.2019 (рисунок 21.3). Максимум положительной разности потенциалов в тропосфере над установкой. Начало резкого роста отрицательного тока растекания заряда реки. Положительное возмущение ПЭС. В Закавказье раскрытие дополнительного канала выхода флюидов в Рионской впадине, западнее магнитного меридиана. Высота постоянно генерируемого в одном месте облака 10 км. В последующее время, до 01:00, облако ветром сносит на восток, но место его активной генерации - неизменно, высота растёт до 12 км. В 12:30 имеет место положительное возмущения ПЭС.

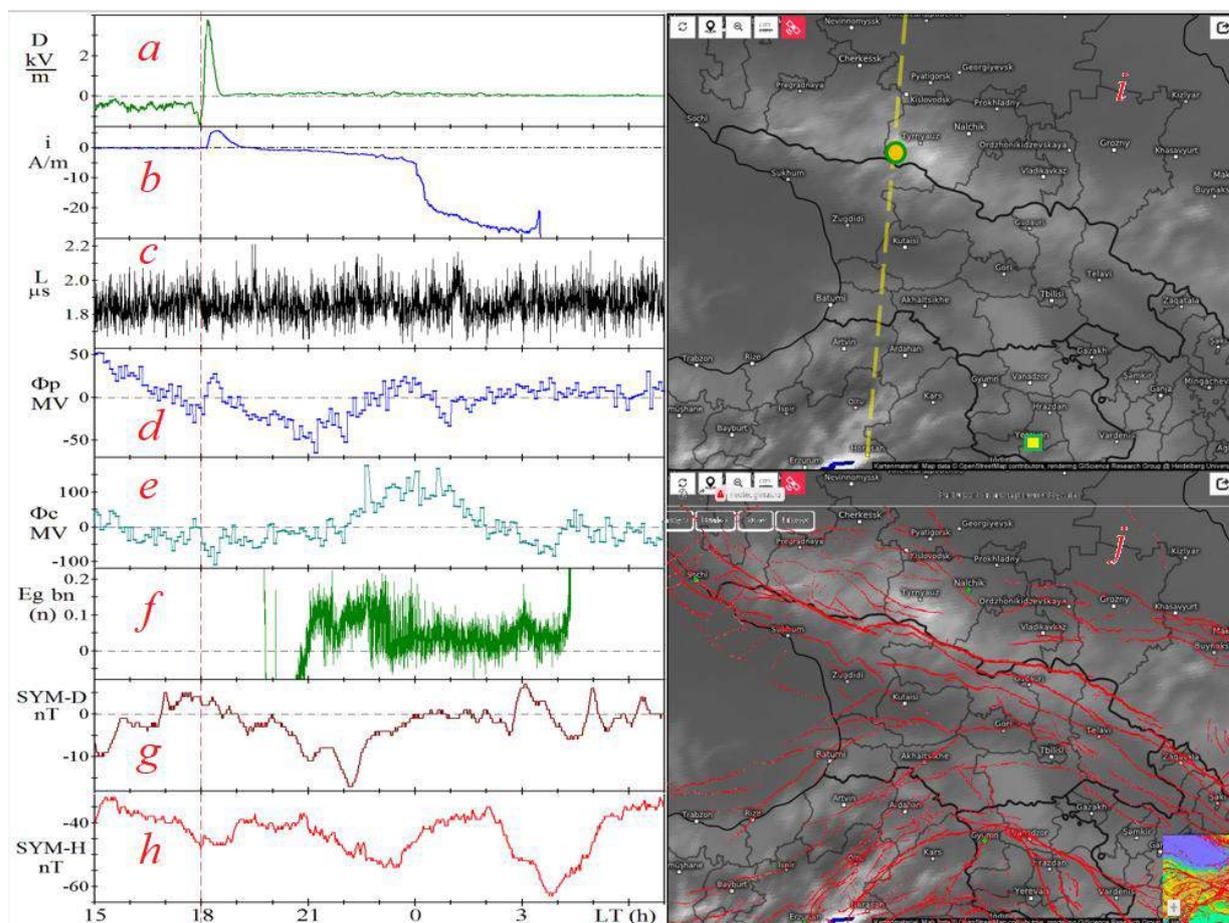
01:00 02.09.2019 (рисунок 21.4). Импульсный скачок разности потенциалов в тропосфере на периферии. Начало спада положительного поля над установкой. Начало роста положительного возмущения ПЭС и положительного возмущения тока растекания заряда реки коррелирующее с ним. В Закавказье максимальная высота в месте выхода флюидов (12 км) в Рионской впадине.

01:30 02.09.2019 (рисунок 21.5). Стабилизация поля на периферии. Падение положительного поля над установкой. Завершение положительного возмущения ПЭС. В Закавказье пониженная высота флюидов (высота облака 10 км). Одновременно с этим, рядом раскрываются два новых выхода.

03:00 02.09.2019 (рисунок 21.6). Максимальное значение отрицательного тока растекания заряда реки. Быстрое понижение разности потенциалов в тропосфере над

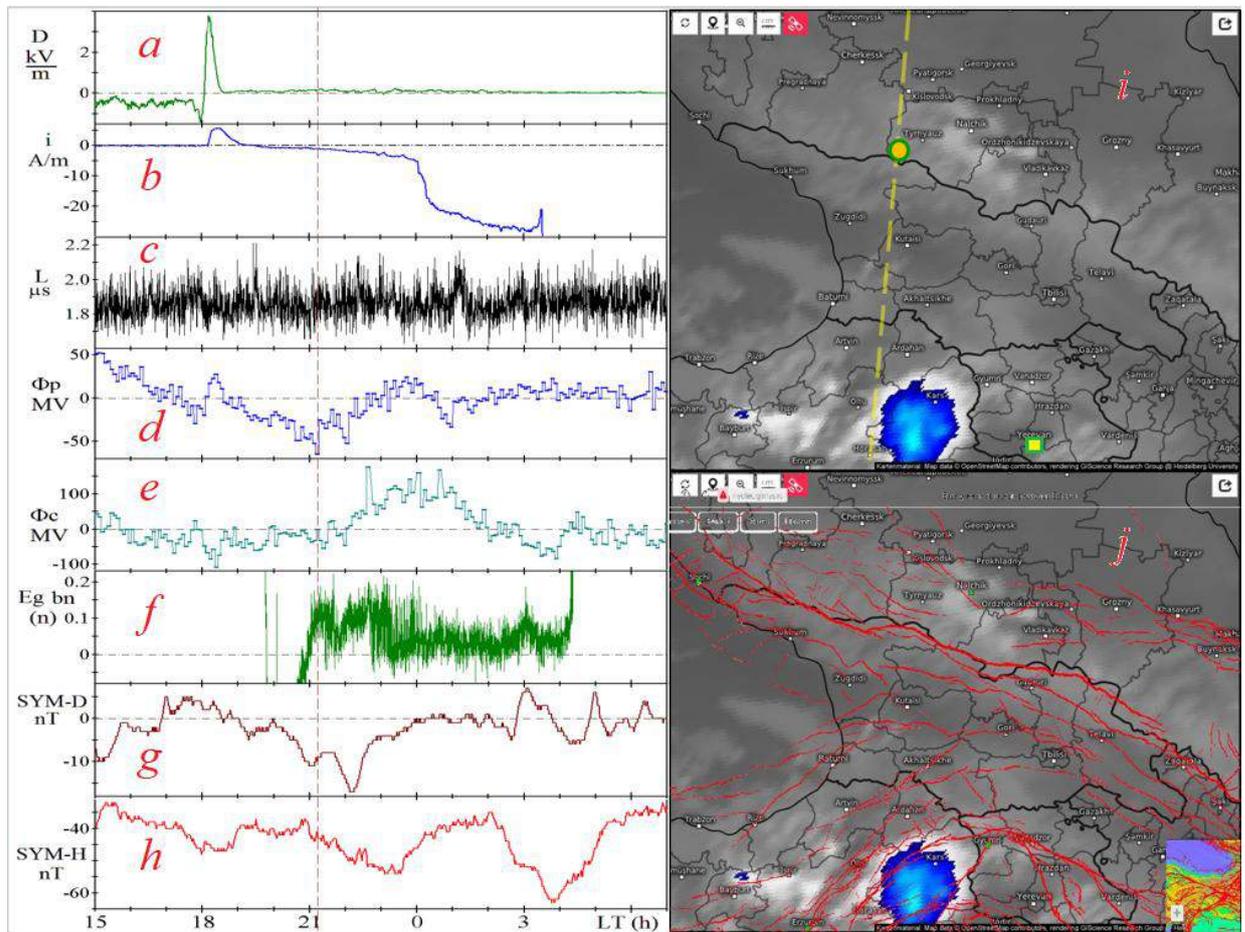
установкой с нулевого до отрицательного значения. Максимальная яркость свечения неба над установкой, зафиксированная в диапазоне 25° – 70° южнее зенита. Локальный максимум ПЭС. Локальный максимум $SUM - D$. Временная стабилизация падения $SUM - H$. В Закавказье максимальная высота облака (12 км) генерируемого в Рионской впадине, расположена на магнитном меридиане общем с установкой. Снижение активности облака в Армянском нагорье (высота 8 км).

04:15 02.09.2019 (рисунок 21.7). Завершение всех аномальных возмущений данных, регистрируемых установкой «Ковёр». В Закавказье без значительных изменений, но начался массовый выход флюидов с поверхности Чёрного моря.



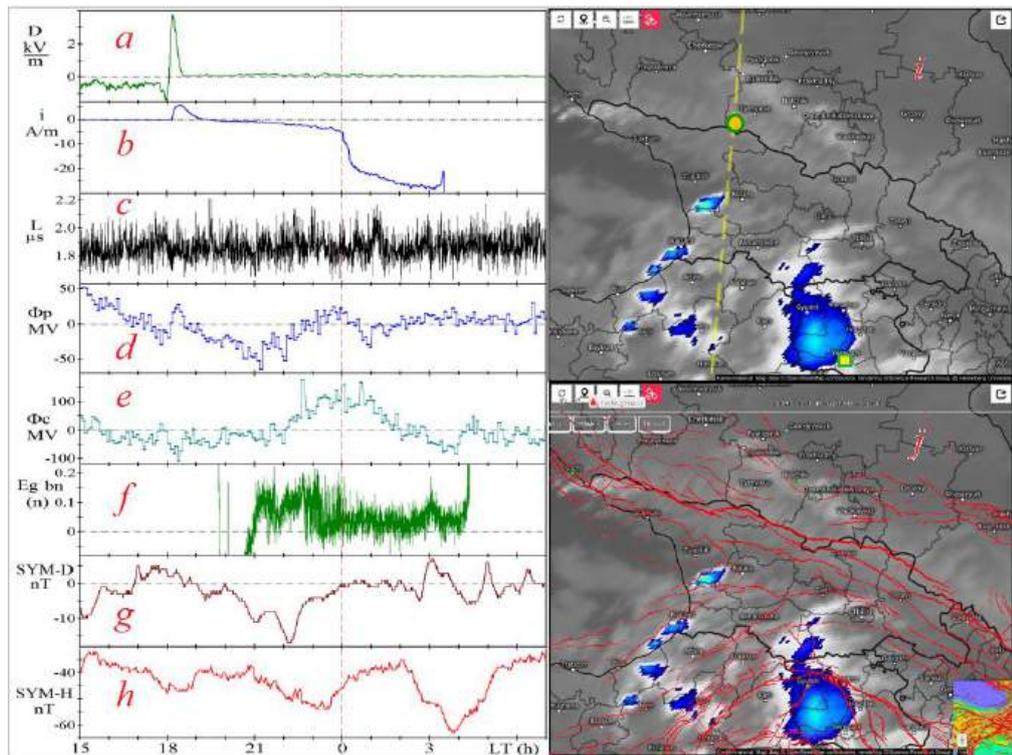
a) Электрическое приземное поле; *b)* Ток растекания в грунт электрического заряда реки на погонный метр; *c)* Задержка радиосигнала точного времени спутников *GPS*; *d)* Разность потенциалов в тропосфере периферийной области (усреднение 5 мин); *e)* Разности потенциалов в тропосфере над установкой (усреднение 5 мин); *f)* Яркость свечения неба в относительных единицах (скважность 10 с); *g)* *Y*-компонента дипольного поля Земли (*SYM-D* индекс) [78] (скважность 1 мин); *h)* *X*-компонента дипольного поля Земли (*SYM-H* индекс) [78] (скважность 1 мин); *i)* Соответствующая моменту карта ($700 \times 550 \text{ км}^2$) распределения облачности по высоте, усреднённой за 15 минут для Грузии [74]. Тёмно-синий цвет отвечает границе облачности на высоте 8 км, оттенки серого – ниже. Голубой – 10 км, жёлтый – 12 км. Жёлтым кружком обозначено расположение установки «Ковёр». Пунктирной линией обозначен магнитный меридиан, проходящий через неё. Жёлтым квадратом – город Ереван. *j)* Та же карта, совмещённая с картой разломов с ресурса [75].
 Везде, где не указано, усреднение 20 с

Рисунок 21.1 – Момент 18:00 LT 01.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



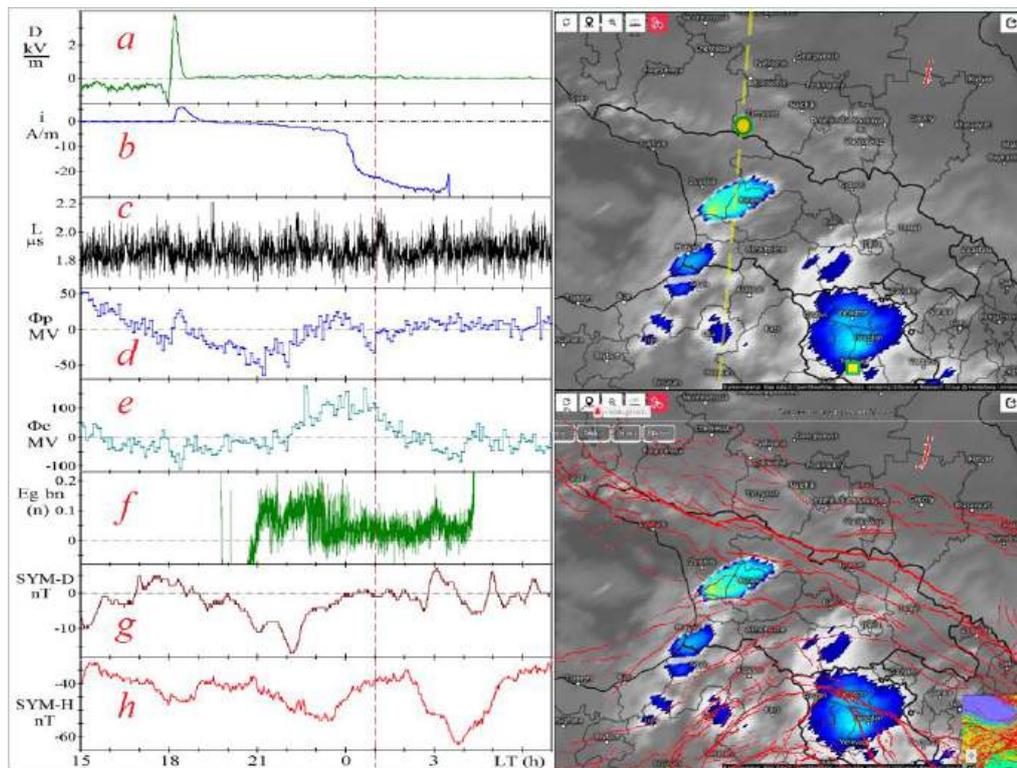
Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.2 – Момент 21:15 LT 01.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



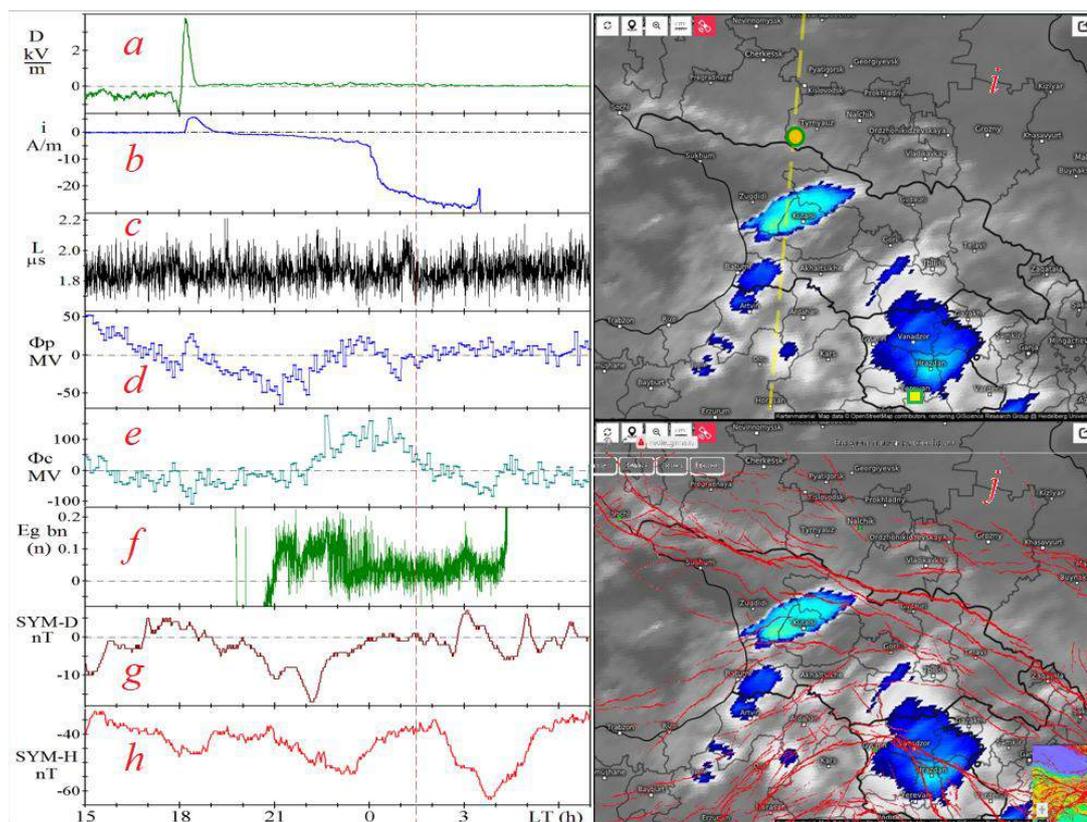
Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.3 – Момент 00:00 LT 02.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



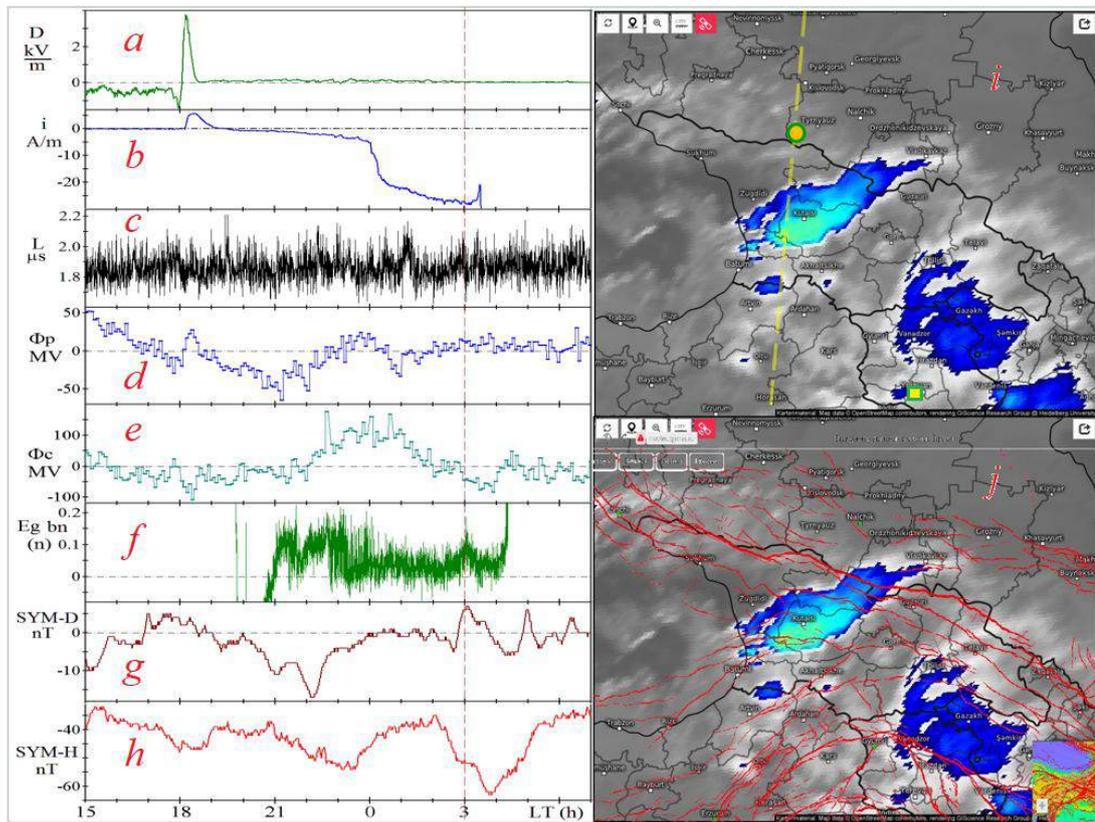
Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.4 – Момент 01:00 LT 02.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



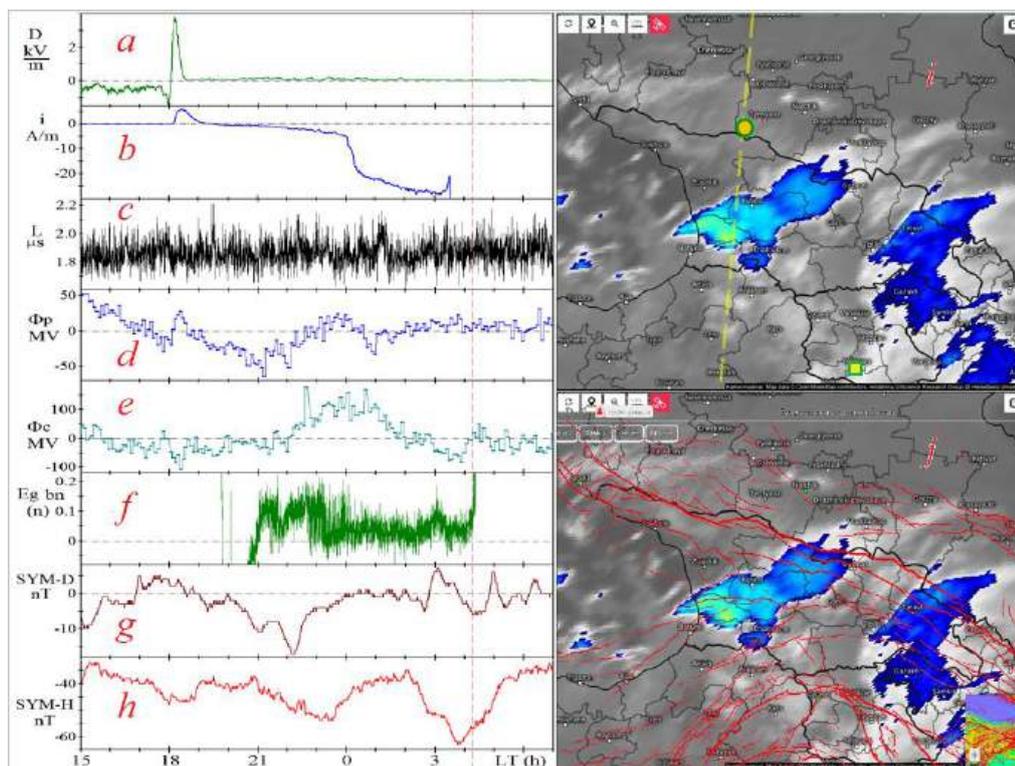
Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.5 – Момент 01:30 LT 02.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.6 – Момент 03:00 LT 02.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)



Описание параметров приведено в подписях к рисунку 21.1

Рисунок 21.7 – Момент 04:15 LT 02.09.2019 (отмечен вертикальной пунктирной линией)

21.2. Модель происхождения вариаций сейсмического электрического тока в литосфере

Согласно результатам томографического исследования недр Кавказа, пластичная порода литосферной мантии под корой практически вся заместилась астеносферой. Лишь под зоной Малого Кавказа обнаруживается жёсткий блок, перекрывающий доступ флюидов астеносферы к подошве коры. Вдоль шовных зон, начиная с района развилки сутуры Измир–Анкара–Эрзинджан на южную ветвь и северную ветвь – Севано – Акеринскую, в районе Ахурянского глубинного разлома, а также в районе Рионской впадины и Приэльбрусья, астеносфера проявляется уже на 10 км [79, 80]. Флюиды, поднимаясь из астеносферы подпирают кору в этих относительно тонких областях, просачиваются сквозь неё, запуская электрокинетический механизм. В литосфере распределяется сейсмогенный ток. Под корой поднимается давление, а вместе с ним меняется проводимость астеносферы. В результате, в зависимости от напряжения, должно меняться и распределение токов в литосфере, даже при наличии в ней каналов (шовных зон) с одинаковой электродвижущей силой, но разным ограничением по току - площадью сечения. На рисунке 21.8 (а) приведена электрическая схема, описывающая этот процесс.

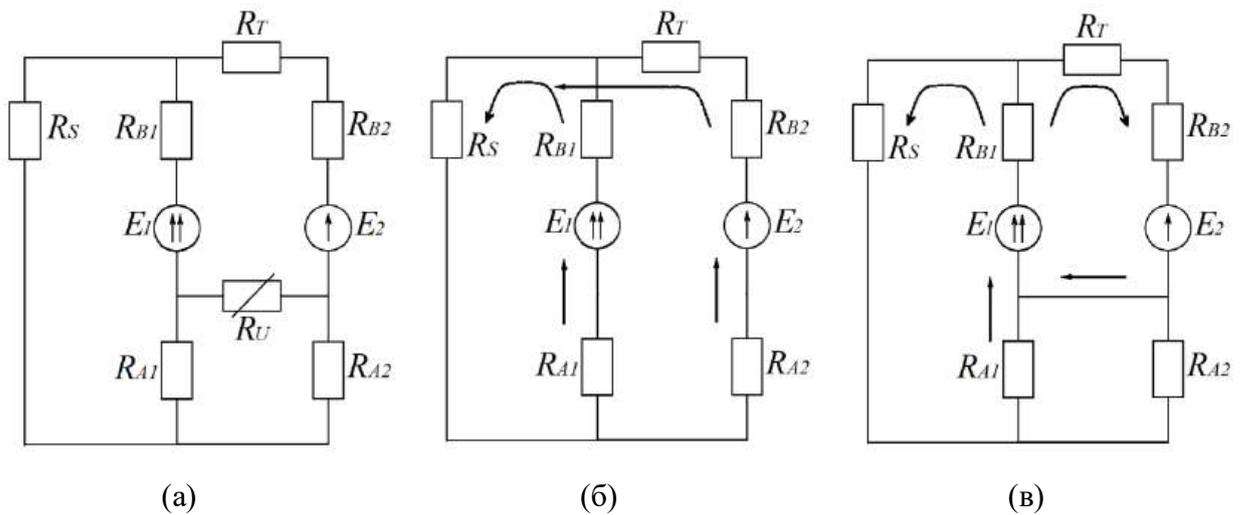


Рисунок 21.8 – Электрическая схема управления литосферных токов переменным давлением в астеносфере

E_1 и E_2 – электродвижущие силы электрокинетического механизма для шовных зон 1 и 2. R_{b1} и R_{b2} их электрическое сопротивление, складывается из сопротивлений на входе в разломы шовной зоны и на выходе. Их значение определяется удельным сопротивлением соответствующей породы и площадью канала. R_{a1} и R_{a2} – сопротивления контактов на границе кора – астеносфера для зон 1 и 2 в ненапряжённом состоянии. R_T – сопротивление по поверхности земли между зонами. R_U – сопротивление матрицы астеносферы, зависящее от вариаций давления в астеносфере. R_S – сопротивление канала аналогичного каналам 1 и 2, но с астеносферой без напряжений, например в Чёрном море.

Далее в таблице 21.1 приводятся используемые в расчёте параметры. Удельные сопротивления: $\rho_{пов} = 10^2$ Ом·м (поверхность земли), $\rho_{аст} = 20$ Ом·м (астеносфера). Площади контактов: $S_{b1} = 10^9$ м² (площадь сечения выхода флюидов на поверхность в Закавказье, определяется по площади грозовой активности); $S_{a1} = 10^9$ м² (площадь сечения входа флюидов из астеносферы в кору литосферы в Закавказье, определяется по площади грозовой активности); $S_{b2} = 10^8$ м² (площадь сечения выхода флюидов на поверхность в Приэльбрусье, определяется по площади вулканического очага Эльбруса), $S_{a2} = 10^8$ м² (сечение входа флюидов из астеносферы в кору литосферы в Приэльбрусье, определяется по площади вулканического очага Эльбруса); $d = 1$ м (размерный множитель).

Таблица 21.1 – Значения сопротивлений

Обозначение межконтактного сопротивления	Расчётная формула	Значение [Ом]
R_{b1} – сопротивление коры между астеносферой и поверхностью в Закавказье	$R_{b1} = \rho_{пов} \cdot d \cdot (2 S_{b1})^{-1} + \rho_{аст} \cdot d \cdot (S_{a1})^{-1}$	$7,00 \cdot 10^{-8}$
R_{a1} – сопротивление контакта выхода из коры в астеносферу в Закавказье	$R_{a1} = \rho_{аст} \cdot d \cdot (S_{a1})^{-1}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
R_{b2} – сопротивление коры между астеносферой и поверхностью в Приэльбрусье	$R_{b2} = \rho_{пов} \cdot d \cdot (4\pi S_{b2})^{-1} + \rho_{аст} \cdot d \cdot (2\pi S_{a2})^{-1}$	$7,00 \cdot 10^{-7}$
R_{a2} – сопротивление контакта выхода из коры в астеносферу в Приэльбрусье	$R_{a2} = \rho_{аст} \cdot d \cdot (2\pi S_{a2})^{-1}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$
R_T – сопротивление между шовными зонами по поверхности земли	$R_T = \rho_{пов} \cdot d \cdot (2\pi S_{b1})^{-1} + \rho_{пов} \cdot d \cdot (2\pi S_{b2})^{-1}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
R_S – характерное сопротивление между шовной зоной Закавказья и ненапряжённой астеносферой по поверхности земли	$R_S = R_T + R_{b1}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$

Оценки электрокинетической эдс. Согласно [34], разность потенциалов E_k в жидкости, обусловленная перепадом давления ΔP на концах капилляров:

$$E_k = n \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \xi \cdot \Delta P \cdot (\eta \sigma)^{-1} = 111 \cdot (0,1 - 1) \text{ В}$$

Здесь для оценки использованы характерные значения параметров, приведённых на стр. 71-72 в [34]. $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ – электрическая постоянная; $\varepsilon = 80$ – диэлектрическая проницаемость раствора; $\sigma \sim 0,01 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$ – характерная электропроводимость среды; $\xi \sim 10^{-2} - 10^{-1} \cdot \text{В}$ – электрокинетический потенциал, равный контактной разности потенциалов между стенками капилляра и жидкостью; $\eta = 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – коэффициент вязкости жидкости; $n = 0,01$ – коэффициент пористости; ΔP – разница литостатического и гидростатического давлений. В нашем случае, $\Delta P = (\rho_{гр} - \rho_{в})gH = 1,57 \cdot 10^8 \text{ Па}$, где $\rho_{гр} = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность гранита, $\rho_{в} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность воды, $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ – ускорение свободного падения, $H = 10^4 \text{ м}$ – характерная толщина коры над астеносферой.

Далее решается задача зависимости токов от переменного значения проводимости матрицы астеносферы. Для крайних значений $R_U = 0$, и $R_U = \infty$, имеем: 1) $I_{RT}(\infty) = 1,36 \cdot (10^5 - 10^6)$ А (см. рис. 8(б)), 2) $I_{RT}(0) = -5,33 \cdot (10^4 - 10^5)$ А (см. рисунок 8(в)). За положительное значение тока на сопротивлении R_T принято направление от зоны 2, соответствующую Приэльбрусью, в сторону зоны 1.

Решение 1) для пренебрежимо малого значения возмущения стрессового давления соответствует началу сейсмо–тектонического возбуждения и отвечает положительному току растекания в реке. Решение 2) для большого значения стрессового давления отвечает уже отрицательному току растекания. Это и наблюдалось в эксперименте.

21.3. Обсуждение результатов

Ранее, в ряде публикаций, сообщалось о регистрации на установке «Ковёр» необычных фактов регистрации в хорошую погоду атмосферного поля, характерного для гроз [29], и импульсных подземных разрядов [30], приводящих к его перестройке в горизонтальной плоскости. Сообщалось о регистрации электрического тока растекания в землю от рядом расположенной реки. На каждый метр её длины 10 А [77]. Учитывая протяжённость реки в неизменных характерных условиях (~10 км между разломами), ожидается что в ущелье в исследуемый период выходил колоссальный теллурический ток ~100 кА, сопровождавший наблюдаемые явления в хорошую погоду.

Оценки, проведённые выше, основанные на реалистичных данных, дают значения для полного тока растекания из шовной зоны Приэльбрусья того же порядка $\sim 10^5$ А, при этом, объясняя его знакопеременность. Этот факт, вполне соответствует описанному в эксперименте процессу.

Нужно добавить, что конвективный генератор в Закавказье поднимает часть положительного заряда на границу тропосферы и далее в ионосферу. Но, по закону сохранения токов, этот принудительно вынесенный в ионосферу заряд не будет растекаться, как отмечается в работе [36], а сконцентрируется над той областью, где нет конвекции, чтобы замкнуть цепь. Таким образом может формироваться электрическое поле в хорошую погоду, но характерное для гроз.

Учитывая импульсную реакцию деформированных пород в состоянии близком к разрушению, в результате которой раскрываются дополнительные проходы для сжатых флюидов, давление должно резко меняться, перестраивая глобальное распределение токов в литосфере. Это перераспределение должно менять поле в тропосфере. Возможно, этот механизм объясняет регистрацию на установке «Ковёр» импульсных горизонтальных разрядов, в хорошую погоду.

21.4. Выводы

Получены свидетельства корреляции сейсмической грозовой активности над глубинными разломами Армянского нагорья и Малого Кавказа с возмущениями электрических параметров атмосферы и земной поверхности, измеренных в хорошую погоду в районе Приэльбрусья Центрального Кавказа установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН.

Предложена модель повышения проводимости астеносферы на 1 – 2 порядка под действием растущего выхода флюидов, повышающих в ней давление. Значительное возрастание проводимости астеносферы приводит к циркуляции сейсмических электрических токов в литосфере. На поверхности земли процесс проявляется как инверсия теллурических токов во времени.

Многokратное повышение проводимости астеносферы приводит к вовлечению на больших масштабах областей с хорошей погодой в процесс развития сейсмических гроз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задачам 1, 3 вошли в число важнейших достижений Института в 2025 году.

1. Задача «Увеличение эффективного объема глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD».

Установлены и запущены в режиме набора данных 14 кластеров телескопа, в результате чего рабочий объем Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил $0,7 \text{ км}^3$ и остается крупнейшим из работающих телескопов в Северном полушарии.

Проведен плановый ремонт и регламентные работы по поддержанию работоспособности телескопа, завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2026 г.

2. Задача «Непрерывный набор, сохранение и анализ экспериментальных данных».

Запущена потоковая система обработки данных телескопа с двумя уровнями задержки (10 мин и 24 часа). Набран банк из 2000 восстановленных нейтринных событий в трековом канале, для которого ожидаемая контаминация атмосферными мюонами составляет 3%.

3. Задача «Получение статистически обеспеченного результата в исследовании глобального диффузного потока нейтрино высоких энергий астрофизической природы».

В результате анализа данных нейтринного телескопа Baikal-GVD за 2018-2024 годы получено ограничение на величину диффузного потока астрофизической природы в интервале энергий выше 10 ПэВ. В области низких энергий рассматриваемого диапазона полученное ограничение сопоставимо по своему значению с аналогичным ограничением эксперимента IceCube и является более строгим, чем ограничение эксперимента PAO(Auger). В результате совместного анализа данных экспериментов IceCube, PAO, Baikal-GVD и KM3NeT получена оценка величины потока космогенных нейтрино со спектром E^{-2} . Для определения природы события KM3-230213A и выяснения источников космических лучей ультравысоких энергий требуется дальнейший набор данных нейтринных телескопов.

Результаты исследований по теме Задачи 3 вошли в перечень важнейших работ ИЯИ РАН за 2025 год.

4. Задача «Разработка и внедрение методов долговременного хранения и обеспечения доступа к данным Baikal-GVD».

Разработана трёхкомпонентная система хранения данных Baikal-GVD, обеспечивающая, с одной стороны, оперативный доступ к данным телескопа, с другой – их надёжное резервирование. Система включает в себя облачное хранилище ЛИТ ОИЯИ, ленточное хранилище EOS-СТА ЛИТ ОИЯИ, хранилище ИЯИ РАН, а также программные средства репликации данных между перечисленными хранилищами.

5. Задача «Подготовка установок УНУ ГГНТ к проведению экспериментов с высокоинтенсивными источниками нейтрино и антинейтрино. Разработка систем измерения активности источников, разработка и проведение плана модернизации систем ГГНТ и галлиевой мишени для проведения измерений с источниками с целью исключить или усилить галлиевую аномалию, и дать дополнительные доказательства, являются ли осцилляции в стерильные нейтрино наиболее вероятным ее решением».

В 2025 году проводились работы по проверке и подготовке систем и установок УНУ ГГНТ к проведению экспериментов с высокоинтенсивными источниками нейтрино и антинейтрино, разработан план необходимой модернизации систем ГГНТ, выбран оптимальный вариант модернизации галлиевой мишени для проведения эксперимента с источником ^{58}Co на трехзонной галлиевой мишени.

6. Задача «Создание прототипов Большого баксанского нейтринного телескопа (ББНТ) и проведение физических измерений на прототипах ББНТ».

Продолжались работы на полутонном прототипе проекта Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ).

Ведутся работы по подготовке и пуску следующего пятитонного прототипа.

7. Задача «Интерпретация результатов детектора Борексино с точки зрения поиска и определения величины потока антинейтрино от распадов ^{40}K в Земле».

Детектор Borexino обладает способностью регистрировать потоки антинейтрино наряду с солнечными нейтрино. Антинейтринные потоки генерируются в недрах Земли изотопами естественной радиоактивности, а также ядерными реакторами атомных электростанций. Был проведён анализ последних данных детектора Borexino с использованием антинейтринных потоков, добавив их к известным фонам и потокам солнечных нейтрино. В результате был обнаружен большой поток антинейтрино от распадов ^{40}K . При этом все потоки солнечных нейтрино стали согласовываться с моделью Солнца малой металличности.

8. Задача «Эксплуатация оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН) в режиме мониторинга гравитационно-волновых всплесков на уровне чувствительности 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Поиск и регистрация гравитационно–нейтринных корреляций».

Получены новые данные долговременных наблюдений на оптоакустической гравитационной антенне (ОГРАН) за статистикой галактических релятивистских коллапсов на теоретически оправданном уровне чувствительности. Установлена новая верхняя граница для событий указанного типа на основе параллельного (двухканального нейтрино-гравитационного) мониторинга коллапсирующих объектов.

Получены новые данные по статистике ньютоновских высокочастотных вариаций гравитационного градиента в подземных туннелях БНО ИЯИ РАН. Данные показывают преимущество подземных лабораторий БНО по отношению к европейским конкурентам, предлагаемым для размещения гравитационных детекторов 3-го поколения. Эти же данные предоставляют материал для уточнения и дополнения картины геодинамических процессов внутренней Земли, порождающих высокочастотные компоненты ньютоновского гравитационного шума.

Получены новые экспериментальные данные по использованию прецизионных оптических измерителей (резонаторы ФП высокой резкости) в гравитационных экспериментах с пробными телами.

Полученные результаты предварительных экспериментов с моделью Гироскопа Саньяка подтверждают перспективность продолжения исследований, дают возможность даже на малой модели с периметром 20 см выйти на уровень чувствительности 10^{-3} угл. сек/с при стабилизации температуры, соответствующем магнитном экранировании и дополнительной алгоритмической коррекции остаточных колебаний температуры, что соответствует $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ рад/(с Гц^{1/2}), за время накопления один–четыре часа. При успешной долговременной стабилизации параметров установки, в частности в условиях подземного размещения в лаборатории БНО ИЯИ РАН, будет возможно и увеличение времени накопления данных, что позволит еще больше увеличить чувствительность.

9. Задача «Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторе LVD (Гран Сассо, LNGS)».

В 2025 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд с помощью нейтринных детекторов. По данным детектора LVD установлено ограничение на частоту вспышек в Галактике: менее 1 события за 14,3 г. на 90% уровне достоверности.

10. Задача «Поиск совпадений нейтринных событий LVD (Гран Сассо, LNGS) с событиями от астрофизических источников».

В 2025 году разрабатывались методики поиска редких сигналов в детекторах LVD в совпадении с данными известных астрофизических источников. Проведены оценки фона в выбранных временных диапазонах. Проводится анализ статистики.

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

План работ по задаче на 2025 год выполнен полностью. На установках LHAASO были получены значимые научные результаты, превосходящие мировой уровень. Этого удалось достичь благодаря уникальным параметрам установок эксперимента LHAASO, а именно, огромной площади, занимаемой детекторами, большой плотности (малым расстояниям между ними) и информативности детекторов, и их различных типов: ~5500 электронных детекторов, ~1200 мюонных детекторов, а также черенковских детекторов разного типа. Все это позволило достичь огромной светосилы установки для целей гамма-астрономии и уникально низкого углового разрешения, равного 0,05 градуса, что помогло, в свою очередь, получить выдающиеся научные результаты: открыть неизвестные ранее гамма-источники в нашей Галактике; измерить потоки и спектры излучения многих гамма-источников.

Продолжены исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от галактических и внегалактических локальных источников с помощью узкоугольных атмосферных черенковских телескопах изображения TAIGA-IACT в составе экспериментального комплекса TAIGA. Продолжены исследования диффузного потока гамма-квантов сверхвысоких энергий на сцинтилляционной установке TAIGA-GRANDE. Продолжены работы по расширению установки мюонных детекторов TAIGAMuon.

12. Задача «Мониторирование известных и поиск еще неоткрытых галактических и внегалактических источников гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ в экспериментах TAIGA и LHAASO».

План работ по задаче на 2025 год выполнен полностью. Ведется набор научной информации в непрерывном режиме. Поступающая информация оперативно обрабатывается и анализируется. Показано, что сверхновые вряд ли могут рассматриваться в качестве основных источников космических лучей. В отчетном году были опубликованы две статьи в высокорейтинговых журналах: получены ограничения на потоки диффузного

гамма-излучения от гигантских молекулярных облаков (GMC) и от гипотетических вспышек первичных черных дыр (РНВ). Поставлен лучший в мире верхний предел.

В эксперименте TAIGA продолжены измерения потока и энергетического спектра гамма-квантов высоких энергий от остатка сверхновой в Крабовидной туманности телескопами TAIGA-IACT в моно- и стерео-модах. Продолжены исследования потоков гамма-квантов высоких энергий от источника Fermi Cygnus Cocoon.

13. Задача «Поиск солнечных аксионов с помощью пропорциональных счетчиков».

Первый счетчик полностью собран с анодной нитью из вольфрама диаметром 20 мкм. Проведены тестовые измерения при заполнении счетчика газовой смесью Ar+2 % Xe. По результатам тестовых измерений сделан вывод о необходимости использовать в качестве анода нить из позолоченного вольфрама диаметром 10 мкм, что позволит снизить рабочее напряжение на счетчике, а также улучшить энергетическое разрешение. Для повышения эффективности регистрации намечено заполнение счетчика криптоном высокой чистоты 6.0 (99,9999%) при давлении 1 атм.

Планируется проведение с помощью нового счетчика поисковых измерений в течение года и достижение за один год живого времени измерений уровня чувствительности по константе связи аксионов с нуклонами на уровне $|g_{3AN} - 1,19 \cdot g_{0AN}| \leq 2,2 \cdot 10^{-6}$, что ниже существующего верхнего предела $|g_{3AN} - 1,19 \cdot g_{0AN}| \leq 3,7 \cdot 10^{-6}$ в эксперименте с мишенью из Fe-57 [5] для области масс аксионов больше 1 эВ.

План работ на 2025 год выполнен. Запланировано существенное повышение чувствительности счетчика за счет нанесения на катод ультратонких слоев изотопа железа Fe-57, а также улучшение рабочих характеристик счетчика путем оптимизации конструкции и состава рабочего газа.

14. Запуск в работу установки «Ковер-3», обеспечение работоспособности установки, проведение набора информации по регистрации кандидатов в фотонные ливни сверхвысокой энергии, поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических источников».

Работы, запланированные на 2025 год выполнены, в рамках которых выполняется постепенное и поэтапное развитие экспериментальной установки «Ковер-3». Ведется бесперебойный набор экспериментальных данных, развиваются программы моделирования установки, которые позволяют получать набор данных, который будет использован при решении широко круга задач.

15. Задача «Изучение спектра, массового состава и анизотропии космических лучей в диапазоне энергий от 200 ТэВ до 100 ЭэВ по данным установок TAIGA, LHAASO и Telescope Array».

Методом ШАЛ на установке Km2A измерен спектр протонов в диапазоне 0,2 – 10 ПэВ. Установка ENDA-64 начала штатный набор информации с 02.01.24. Идет накопление научной информации и ее непрерывный анализ. Кроме того, проводится совместное компьютерное Монте-Карло моделирование установок ENDA-64 и Km2A, с помощью пакетов CORSIKA и GEANT всех разновидностей эксперимента с учетом геометрии установок, высоты наблюдения и т. д. В отчетном году по данной теме подготовлены и опубликованы 2 расчетно-методические статьи и одна с предварительными результатами измерений. Продолжался штатный набор информации на установках ENDA-64 и ENDA-INR. Проводится оперативный анализ объединенной по нескольким установкам информации. Получены и опубликованы предварительные экспериментальные результаты.

На установках Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE эксперимента TAIGA продолжены исследования энергетического спектра и массового состава космических лучей в области энергий 10^{14} – 10^{18} эВ.

В рамках расширения эксперимента до эффективной площади ~ 100 км² (Проект TAIGA-100) разработан и создан прототип первого водного черенковского мюонного детектора проекта. Ведутся работы по тестированию, отладке и калибровке этого детектора.

В рамках анализа данных установки Telescope Array продемонстрировано, что минимальные модели КЛУВЭ на основе этих данных (лёгкий состав, стандартная космологическая эволюция источников) позволяют объяснить событие KM3-230213A как космогенное нейтрино без введения экзотических предположений и не входя в существенное противоречие с данным всех крупных нейтринных обсерваторий (уровень рассогласованности около 2σ). Полученные предсказания по гамма-излучению не противоречат наблюдениям, а будущее повышение чувствительности экспериментов КЛУВЭ к гамма-лучам ультравысоких энергий позволит проверить рассматриваемые сценарии.

16. Задача «Усовершенствование модели FANSY 2.0/2D с компланарной генерацией частиц в 2D пространстве во взаимодействиях протонов ПКИ при энергиях выше 1 ПэВ».

Получены значимые научные результаты. Усовершенствован программный пакет FANSY 2.0/2D. Уточнены параметры алгоритма процесса компланаризации поперечных импульсов наиболее энергичных частиц, в частности, для моделирования компланарной

генерации частиц с различными временами существования локальной $3D \leftrightarrow 2D$ эволюции сигнатуры метрики пространства.

17. Задача «Моделирование развития стволы ШАЛ от частиц ПКИ на основе пакетов FANSY 2.0 и CORSIKA».

Получены значимые научные результаты. Сформулирован новый подход к определению компланарных событий.

18. Задача «Исследование азимутальных характеристик наиболее энергичных потоков в стволах ШАЛ».

Получены значимые научные результаты. Впервые показано, что имеющиеся модели взаимодействий частиц ПКИ неспособны объяснить имеющийся набор экспериментальных данных по компланарности наиболее высокоэнергичных потоков энергии в стволах ШАЛ.

19. Задача «Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации нейтринных вспышек от взрывов сверхновых звёзд с коллапсом ядра, мониторингирование потоков нейтрино от коллапсирующих звезд и поиск редких нейтринных событий от Галактических источников».

В течение 2025 года на БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации по задаче регистрации нейтринных всплесков, проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установке, и мониторинг вспышек сверхновых в нашей галактике. Получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей галактике на 90% уровне достоверности: $f_{\text{col}} < 0,059 \text{ год}^{-1}$.

20. Задача «Проведение на БПСТ набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино с пороговой энергией 1 ГэВ из нижней полусферы. Поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино».

В течение 2025 года поддерживался непрерывный набор информации на БПСТ по задаче регистрации мюонных нейтрино и антинейтрино из нижней полусферы. Проводились обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установке, поиск астрофизических источников мюонных нейтрино и антинейтрино по возможным совпадениям с событиями на платформе GCN.

21. Задача «Результаты исследования корреляций возмущения потока мюонов космических лучей, электрического поля в стратосфере и высотных разрядов».

В подотчётный период опубликовано две статьи, демонстрирующие факт влияния удалённых геофизических процессов на регистрацию установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН космических лучей. Построена модель, на качественном уровне описывающая это влияние. Предложенная модель, впервые указывает на механизм выделения области подготовки землетрясений над невозмущёнными районами, многократным повышением проводимости астеносферы.

Работа находится на стыке сейсмологии, атмосферного электричества и физики космических лучей, что делает актуальным использование её результатов в области исследования предвестников землетрясений и взаимодействия геосфер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Light Sterile Neutrinos: A White Paper [Электронный ресурс] / Abazajian K. N. [et al.] // arXiv:1204.5379 [hep-ph]. – 2012. – 269 p.
- 2 Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST) / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2022. – vol. 128. – p. 232501.
- 3 A Search for electron-neutrino transitions to sterile states in the BEST experiment / Barinov V. V. [et al.] // Phys. Rev. C. – 2022. – vol. 105. – p. 065502
- 4 Новый эксперимент по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr / Гаврилюк Ю.М. [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101. – No.10. – С.739–745.
- 5 Probing the axion–nucleon coupling with the next generation of axion helioscopes / Di Luzio L. [et al.] // Eur. Phys. J. C. – 2022. – Vol. 82, No 2. – Art. 120. – P. 1–15.
- 6 Probing high-energy solar axion flux with a large scintillation neutrino detector / Lucente G. [et al.] // Phys. Rev. D – 2022. – Vol. 106, No 12. – Art. 123007. – P. 1–15.
- 7 Moriyama S. Proposal to Search for a Monochromatic Component of Solar Axions Using ^{57}Fe // Phys. Rev. Lett. – 1995. – Vol. 75, No 18. – P. 3222–3225.
- 8 Search for resonant absorption of solar axions emitted in M1 transition in ^{57}Fe nuclei / A.V. Derbin [et al.] // Eur. Phys. J. C. – 2009. – Vol. 62. – P. 755–760.
- 9 Search for hadronic solar axions / Akhmatov Z.A. [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – 1787. – 012036. – P. 1–5.
- 10 M.Yu. Kuznetsov, N.A. Petrov, Y.S. Savchenko. Ultra-high energy event KM3-230213A as a cosmogenic neutrino in light of minimal UHECR flux models // Preprint. – <https://arxiv.org/abs/2509.09590>.
- 11 Сотрудничество «Памир». Изучение событий с компланарным разлётом частиц при сверхвысоких энергиях // Известия АН СССР, сер. физ. – 1986. – том 50. – стр. 2125.
- 12 Xue L., Dai Z.Q., Li J.Y. Study of alignment of high energy γ -hadron families with iron emulsion chambers // Proc. 26th ICRC, Salt Lake City. – 1999. – Vol. 1. – P. 127.
- 13 Apanasenko A.V., Dobrotin N.A., Goncharova L.A. et al. Stratospheric superfamily with $\Sigma E_\gamma \sim 2 \cdot 10^{15}$ eV // Proc. 15th ICRC, Plovdiv. – 1977. – Vol. 7. – P. 220.
- 14 Capdevielle J.N., Attallah R., and Talai M.C. Coplanar emission in gamma-ray families, geometrical and dynamical coincidence or new mechanism? // Proc. 27th ICRC, Hamburg. – 2001. – Vol. 1. – P. 1410.

- 15 Royzen I.I. Theoretical approach to alignment phenomenon // *Mod. Phys. Lett. A.* – 1994. – Vol. 9. – № 38. – P. 3517.
- 16 Capdevielle J.N. Cosmic ray interactions near the LHC energy range (approach with XREC at mountain altitude and in the stratosphere) // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 2008. – Vol. 175. – P. 137.
- 17 Yuldashbaev T.S., Nuritdinov Kh., Chudakov V. M. Unusual family characteristics at energies above 10 PeV // *Nuovo Cim.* – 2001. – Vol. 24C. – P. 569.
- 18 Mukhamedshin R.A. On a mechanism of coplanar generation of particles at superhigh energies // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 1999. – Vol. 75A. – P. 131.
- 19 Wibig T. Alignment in hadronic interactions // arXiv: hep-ph/0003230.
- 20 Searching for the Layered Structure of Space at the LHC / Anchordoqui L. [et al.] // *Mod. Phys. Lett. A.* – 2012. – Vol. 27 – 1250021.
- 21 Мухамедшин Р.А. Проблема компланарности потоков энергии в стволах ШАЛ // *Ядерная физика.* – 2025. – Т. 88, № 5. – С. 419–426.
- 22 Gonzalez-Garcia M.C., Halzen F., Niro V. Reevaluation of the Prospect of Observing Neutrinos from Galactic Sources in the Light of Recent Results in Gamma Ray and Neutrino Astronomy // *Astropart. Phys.* – 2014. – V.57 - 58. – P. 39 – 48.
- 23 Kalashev O.E., Kusenko A., Essey W. PeV Neutrinos from Intergalactic Interactions of Cosmic Rays Emitted by Active Galactic Nuclei // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – V. 111. – P. 041103.
- 24 On the GeV and TeV detections of the starburst galaxies M82 and NGC 253 / Lacki B.C. [et al.] // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 734, Is. 2. – P. 107 – 120.
- 25 Waxman E., Bahcall J. High Energy Neutrinos from Cosmological Gamma-Ray Burst Fireballs // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – V. 78, Is. 12. – P. 2292 – 2295.
- 26 Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. Вариации потока мюонов космических лучей во время гроз // *ЖЭТФ.* – 2022. – Т. 161, № 4. – С. 497-514. DOI: 10.1134/S1063776122040069.
- 27 Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты / К.Х. Канониди [и др.] // *Изв. РАН, сер. физ.* – 2015. – Т. 79, № 5. – С. 733.
- 28 Хаердинов М. Н., Хаердинов Н. С., Лидванский А. С. Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов, регистрируемых горизонтальной установкой // *Известия РАН, сер. физ.* – 2017. – Т. 81, №2. – С. 246–249. DOI:10.7868/S0367676517020223.

29 Возмущение свечения ночного неба в ясную погоду на средних широтах / Хаердинов Н. С. [и др.] // Изв. РАН. сер. физ. – 2021. – Т. 85, №11. – С. 1657–1659. DOI:10.31857/S0367676521110144.

30 Локальные вариации полного электронного содержания ионосферы, измеренные в горах Северного Кавказа / Хаердинов Н. С. [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. – 2023. – Т. 45, №4. – С. 166–189. DOI: 10.26117/2079-6641-2023-45-4-166-189.

31 Rulenko O.P., Druzhin G.I., Vershinin E.F. Measurements of the atmospheric electric field and natural electromagnetic radiation before the Kamchatka earthquake of November 13, 1993 $M = 7,0$ // DAN. – 1996. – Vol. 348, No. 6. – P. 814-816.

32 Smirnov S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2008. - Vol. 8, No. 4. – P. 745–749. DOI: 10.5194/nhess-8-745-2008.

33 Ryabova S. A., Spivak A. A. Variations in the electrical characteristics of the near-surface atmosphere during strong earthquakes. Observational results // Physics of the Earth. – 2021. – No. 4. – P. 120–132. DOI: 10.31857/S0002333721040074.

34 Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М: МИФИ, 2000.

35 Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals / Freund F. T. [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2009. – Vol. 71. – P. 1824–1834. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.07.013.

36 Surkov V. V., Pilipenko V. A. Can seismogenic atmospheric current influence the ionosphere? // Annals of geophysics. – 2024. – Vol. 67, No. 1. – P. PA107. DOI: 10.4401/ag-9031.

37 Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography / Zabelina I. [et al.] // J. Asian Earth Sci. – 2016. – Vol. 119. – P. 87–89. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.010.

38 Namgaladze A.A. and Karpov M.I. Conduction current and extraneous electric current in the global electric circuit // Russ. J. Phys. Chem. – 2015. – Vol. B9. – P. 754-757. DOI:10.1134/S1990793115050231.

39 Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes // Springer Verlag Publ. – 2004. – P. 44.

40 Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12 / Klimenko M.V. [et al.] // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 48, No. 3. – P. 488-499.

- 41 Sorokin V., Hayakawa M. Plasma and electromagnetic effects caused by the seismic-related disturbances of electric current in the global circuit // *Modern Appl. Sci.* – 2014. – Vol. 8, No. 4. DOI: 10.5539/mas.v8n4p61.
- 42 Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification / Pulinets S.A. [et al.] // *Adv. Space Res.* – 1997. – Vol. 20. – P. 2173-2176.
- 43 Kim V.P., Pulinets S.A., Hegai V.V. The theoretical model of the possible changes in the night-time midlatitude D-region of the ionosphere over the zone of strong earthquake preparation // *Radiophys. Quantum Electron.* – 2002. – Vol. 45. – P. 289-296.
- 44 Sorokin V.M., Ruzhin Yu.Ya. Electrodynamic model of atmospheric and ionospheric processes on the eve of an earthquake, // *Geomagn. Aeron.* – 2015. – Vol. 55. – P. 626-642. DOI:10.1134/S0016793215050163.
- 45 Bezrukov L.B., Sinev V.V. Looking for Geo-Antineutrino Flux from ^{40}K by the Borexino Detector // *Physics of Particles and Nuclei.* – 2025. – Vol. 56, No. 3. – P. 866 – 870. – <https://doi.org/10.1134/S1063779624702423>. Русский текст опубликован в ЭЧАЯ – 2025. - Т. 56, №. 3. – С. 1448 – 1455.
- 46 Bezrukov L.B., Bykovsky A.S., Sinev V.V. Low metallicity solar model finds the prove in Borexino data [Электронный ресурс] // *arXiv.org.* – 2025. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.13470> (дата обращения 08.05.2025).
- 47 Поиск гравитационных сигналов коллапсирующих объектов Галактике / Руденко В.Н. [и др.] // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. Гуманитарные и общественные науки, Федеральное государственное бюджетное учреждение Российский гуманитарный научный фонд.* – 2025. – Том 125, № 1. – С. 56-69.
- 48 Registration of Bursts of Gravity-Gradient and Neutrino Background by Underground Detectors / Rudenko V.N.[et al.] // *Astronomy Reports.* – 2025. – Vol. 69. – P. 775-785. – <https://doi.org/10.1134/S1063772925702117>.
- 49 Регистрация всплесков грави-градиентного и нейтринного фона подземными детекторами / Руденко В.Н. [и др.] // *Астрономический журнал.* – 2025. – Том 102, № 11.
- 50 Повышение чувствительности лазерного гироскопа в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН / Руденко К.В. [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2025. – Том 16, № 6. – С. 118-123.
- 51 Sensitivity Enhancement of a Laser Gyroscope in the Underground Baksan Neutrino Observatory / Rudenko K. V. [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2025. – Vol. 88, No. 9.

- 52 The large-volume detector (LVD): a multipurpose underground detector at Gran Sasso / Bari G. [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 1989. – V. 277 – P.11-16.
- 53 Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector / Agafonova N.Y. [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2015. – V. 802:47.
- 54 SNEWS: the SuperNova Early Warning System / P. Antonioli [et al.] // New J. Phys. – 2004. – V. 6. – P. 114.
- 55 Background and Signal Simulation for Cluster Detection in the LVD Experiment / V. V. Ashikhmin [et al.] (the LVD Collaboration) // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – V. 79. – P. S320–S323. DOI: 10.3103/S0027134924701005.
- 56 Study of Ultra-High-Energy Gamma-Ray Source 1LHAASO J0056+6346u and Its Possible Origins. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO (Collaboration)) // Sci. China Phys. Mech. Astron. – 2025. – Vol. 68, Paper 279505 – <https://doi.org/10.1007/s11433-024-2661-8>.
- 57 Ultra-high-energy γ -ray emission associated with the tail of a bow-shock pulsar wind nebula. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO (Collaboration)) // Innovation. –2025. –Vol. 6(4). – P. 100802. – <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100802>.
- 58 Ultrahigh-energy gamma-ray emission associated with black hole-jet systems / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *National Science Review*. –2025. – nwaf496 – <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf496>.
- 59 Deep view of composite SNR CTA1 with LHAASO in γ -rays up to 300 TeV. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO (Collaboration)) // Sci. China Phys. Mech. Astron. – 2025. – Vol. 68 – 279503 – <https://doi.org/10.1007/s11433-024-2479-4>.
- 60 An Enigmatic PeVatron in an Area around HII Region G35.6–0.5 / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025. – Vol. 979. – P. 70. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad991d>.
- 61 Broadband γ -Ray Spectrum of Supernova Remnant Cassiopeia A. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025. – Vol. 982. – L33. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adb97c>.
- 62 All-Sky Search for Individual Primordial Black Hole Bursts with LHAASO. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2025 – Vol. 135 (18) –181005. – <https://doi.org/10.1103/nkby-9cs3>.
- 63 Constraining the Cosmic-Ray Energy Based on Observations of Nearby Galaxy Clusters by LHAASO. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025.– Vol. 982(1). – L19. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adb97d>.

- 64 Precise measurements of the cosmic ray proton energy spectrum in the “knee” region. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // Science Bulletin – Available online 12 November 2025. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.10.048>.
- 65 Spectrum and Composition of Primary Cosmic Rays, According to Data from the TAIGA-HiSCORE Array / Prosin V. V. [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – P. 907–912. – doi: 10.1134/S1062873825711663.
- 66 Energy spectrum and mass composition of cosmic rays according to the data of the TAIGA-HiSCORE installation / Budnev N. M. [et al.] // PoS. – 2025. – Vol. ICRC2025. – P. 206. – doi: 10.22323/1.501.0206.
- 67 Study of Stability and Consistency of EAS Thermal Neutron Detection at ENDA-64. / Heng-Yu Zhang [et al.] // Radiation Detection Technology and Methods. – 2025. – May 27. – <https://doi.org/10.1007/s41605-025-00571-3>.
- 68 Hybrid Detection of Cosmic Rays with ENDA-64. / Wei Gao [et al.] // Phys. Atom. Nucl. – 2025. – in press.
- 69 Первые экспериментальные результаты, полученные на установке ENDA-INR. / К. О. Куринов [и др.] // ЖЭТФ. – 2025. – Том 168(3). – Стр.343. – <https://doi.org/10.31857/S004445102509007X>.
- 70 Mukhamedshin R.A. On coplanarity of most energetic cores in gamma-ray—hadron families and hadron interactions at $s^{1/2} > 4$ TeV // JHEP. – 2005. – 0505, 049. – doi: 10.1134/S1547477106040030.
- 71 Mukhamedshin R.A. FANSY 1.0: a phenomenological model for simulation of coplanar particle generation in superhigh-energy hadron interactions // Eur. Phys. J. – 2009. – 345. – C 60. – doi: 10.1140/epjc/s10052-009-0945-y.
- 72 Kempa J., Mukhamedshin R., Tamada M. On $p_t(x_L)$ dependence in h-A interactions and lateral features of most energetic particles in EAS cores // J. Phys.: Conf. Ser. 409. – 2013. – 012109. – doi: 10.1088/1742-6596/409/1/012109.
- 73 Dunaevsky A. M., Pashkov S. V., Slavatinsky S.A. Binocular gamma-families and large-pt jets production // Proc. 18th ICRC, Bangalore. – 1983. – Vol. 5. – P. 449.
- 74 WEATHER WHERE? Satellite images. Cloud Tops Alert. Georgia; <https://weather.us>
- 75 База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий (AFEAD), <http://neotec.ginras.ru/database.html>.

76 Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, на фоне магнитосферной бури / Хаердинов Н. С. [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. – 2021. – Т. 34, №1. – С. 189–202. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-189-202.

77 Проявления глобальных возмущений геомагнитного поля в динамике гроз / Хаердинов Н. С. [и др.] // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. – 2021. – Т. 34, №1. – С. 174–188. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-174-188.

78 International Service of Geomagnetic Indices, http://isgi.unistra.fr/indices_asu.php.

79 Seismic structure of the crust and uppermost mantle beneath Caucasus based on regional earthquake tomography / Zabelina I. [et al.] // J. Asian Earth Sci. – 2016. – Vol. 119. – P. 87–89. DOI: 10.1016/j.jseaes.2016.01.010.

80 Mesozoic–Cenozoic structure of the Black Sea–Caucasus region and its relationship with the structure of the upper mantle / Trifonov V. G. [et al.] // Geotectonics. – 2020. – No. 3. – P. 55–81. DOI: 10.31857/S0016853X20030108.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2025 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1 Probing the Galactic neutrino flux at neutrino energies above 200 TeV with the Baikal Gigaton Volume Detector / V. A. Allakhverdyan [et al.] // *Astrophys.J.* – 2025. – V. 982. – Is. 2. – P. 73. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/adb630>.

2 Constraints on the diffuse flux of multi-PeV astrophysical neutrinos obtained with the Baikal Gigaton Volume Detector / V. A. Allakhverdyan [et al.] // *Phys. Rev. D* – 2025. – V. 112. – P. 083025. – <https://doi.org/10.1103/jl3-261w>.

3 Приборы и методы долговременного мониторинга гидрооптических характеристик глубинных вод оз. Байкал / А. В. Аврорин [и др.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Оптика атмосферы и океана.* – 2025. – Т.38. – Вып.5. – С. 367. – УДК 551.463.3. – <https://10.15372/AOO20250506>.

4 Применение инерциальной системы позиционирования для оценки координат и ориентации оптических модулей глубоководного телескопа БАЙКАЛ-GVD / А.В. Аврорин [и др.] (Baikal-GVD Collaboration) // *Приборы и техника эксперимента.* – 2025. – Вып.3. – С.12. – УДК 539.123. – <http://iet.ras.ru/2025/3/pub/12.pdf>.

5 Эксперимент BEST-2 с источником нейтрино ^{58}Co . / Гаврин В.Н. [и др.] // *ЖЭТФ.* – 2025. – Т. 167. – Вып. 3. – С. 338-352. – DOI: 10.31857/S0044451025030058.

6 Measurements of light yield and ^{14}C content in liquid scintillator of a 5-ton prototype of the Baksan Large Neutrino Telescope project / A.Yu. Sidorenkov [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2025. – V. 88. – N. 1. – P. 101-104. – <https://doi.org/10.1134/S1063778825700127>.

7 Infrastructure of 5-ton Prototype of Baksan Large Neutrino Telescope Project. / A.D. Lukanov [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei.* – accepted for publication (2025).

8 Gallium Anomaly and the BEST-2 Experiment with a ^{58}Co Source / Gavrin V.N. [et al.] // *Phys. Part. Nuclei.* – 2025. – Vol. 56. – P. 861–865. – <https://doi.org/10.1134/S1063779624702411>.

9 Bezrukov L.B. Sinev V.V. Looking for Geo-Antineutrino Flux from ^{40}K by the Borexino Detector // *Physics of Particles and Nuclei* – 2025. – Vol. 56, No. 3. – P. 866 – 870. – <https://doi.org/10.1134/S1063779624702423>. Русский текст опубликован в ЭЧАЯ – 2025. - Т. 56, №. 3. – С. 1448 – 1455.

- 10 Поиск гравитационных сигналов коллапсирующих объектов Галактике / Руденко В.Н. [и др.] // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. Гуманитарные и общественные науки, Федеральное государственное бюджетное учреждение Российский гуманитарный научный фонд. – 2025. – Том 125, № 1. – С. 56-69.
- 11 Registration of Bursts of Gravity-Gradient and Neutrino Background by Underground Detectors / Rudenko V.N. [et al.] // *Astronomy Reports*. – 2025. – Vol. 69. – P. 775-785. – <https://doi.org/10.1134/S1063772925702117>.
- 12 Регистрация всплесков грави-градиентного и нейтринного фона подземными детекторами / Руденко В.Н. [и др.] // *Астрономический журнал*. – 2025. – Том 102, № 11.
- 13 Повышение чувствительности лазерного гироскопа в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН / Руденко К.В. [и др.] // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2025. – Том 16, № 6. – С. 118-123.
- 14 Sensitivity Enhancement of a Laser Gyroscope in the Underground Baksan Neutrino Observatory / Rudenko K. V. [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2025. – Vol. 88, No.9.
- 15 Study of Ultra-High-Energy Gamma-Ray Source 1LHAASO J0056+6346u and Its Possible Origins. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. China Phys. Mech. Astron.* – 2025. – Vol. 68, Paper 279505 – <https://doi.org/10.1007/s11433-024-2661-8>.
- 16 Ultra-high-energy γ -ray emission associated with the tail of a bow-shock pulsar wind nebula. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Innovation*. – 2025. – Vol. 6(4). – P. 100802. – <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100802>.
- 17 Ultrahigh-energy gamma-ray emission associated with black hole-jet systems / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *National Science Review*. – 2025. – nwaf496 – <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf496>.
- 18 Deep view of composite SNR CTA1 with LHAASO in γ -rays up to 300 TeV. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Sci. China Phys. Mech. Astron.* – 2025. – Vol. 68 – 279503 – <https://doi.org/10.1007/s11433-024-2479-4>.
- 19 An Enigmatic PeVatron in an Area around HII Region G35.6–0.5 / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025. – Vol. 979. – P. 70. – <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad991d>.
- 20 Broadband γ -Ray Spectrum of Supernova Remnant Cassiopeia A. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025. – Vol. 982. – L33. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adb97c>.

- 21 All-Sky Search for Individual Primordial Black Hole Bursts with LHAASO. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Phys. Rev. Lett.* – 2025 – Vol. 135 (18) –181005. – <https://doi.org/10.1103/nkby-9cs3>.
- 22 Constraining the Cosmic-Ray Energy Based on Observations of Nearby Galaxy Clusters by LHAASO. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Astrophys. J. Lett.* – 2025.– Vol. 982(1). – L19. – <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adb97d>.
- 23 Поиск неупругого рассеяния частиц темной материи на ядрах ^{83}Kr с возбуждением низколежащего ядерного уровня / Дербин А.В. [и др.] // *Журнал технической физики.* – 2025. – Т. 51, вып. 24. – С. 4 - 7. – <https://doi.org/10.61011/PJTF.2025.24.61746.7930>
- 24 Комплексная ливневая установка «Ковер-3» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Исследования в области гамма-астрономии / В.Б. Петков [и др.] // *ЭЧАЯ.* – 2025. – Т. 56, вып. 3. – С. 976–985.
- 25 Системы регистрации установки «Ковер-3» БНО ИЯИ РАН / В.С. Романенко [и др.] // *ЭЧАЯ.* – 2025. – Т. 56, вып. 2. – С. 174–179.
- 26 Precise measurements of the cosmic ray proton energy spectrum in the “knee” region. / Zhen Cao [et al.] (LHAASO Collaboration) // *Science Bulletin* – Available online 12 November 2025. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.10.048>.
- 27 Study of Stability and Consistency of EAS Thermal Neutron Detection at ENDA-64. / Heng-Yu Zhang [et al.] // *Radiation Detection Technology and Methods.* –2025. – May 27. – <https://doi.org/10.1007/s41605-025-00571-3>.
- 28 Hybrid Detection of Cosmic Rays with ENDA-64. / Wei Gao [et al.] // *Phys. Atom. Nucl.* – 2025. – in press.
- 29 Первые экспериментальные результаты, полученные на установке ENDA-INR. / К. О. Куринов [и др.] // *ЖЭТФ.* – 2025. – Том 168(3). – Стр.343. – <https://doi.org/10.31857/S004445102509007X>.
- 30 Method for Isolating the Light Component of CR Using Cherenkov Telescope Data in the TAIGA Experiment / Sveshnikova L. G. [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei.* – 2025. – Vol. 56. – P. 118–121. – doi: 10.1134/S1063779624701272.
- 31 The Optical Throughput Calibration of the TAIGA-IACT Facility / Volchugov P. A. [et al.] // *Physics of Atomic Nuclei.* – 2025. – Vol. 56. – P. 643–646. – doi: 10.1134/1063779624702058.

32 Evaluation of Angular Resolution and Effective Area of the TAIGA-HiSCORE Installation Using Peripheral Stations / Samoliga V. [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – P. 1034—1038. – doi: 10.1134/S1062873825712164.

33 TAIGA-1 Hybrid Complex: The Progress from Cosmic Ray Physics to Gamma Astronomy / Budnev N. M. [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. – 2025. – Vol. 56. – P. 604–611. – doi: 10.1134/S1063779624701995.

34 Differential Sensitivity of the TAIGA–IACT Facility in the Stereo Mode of Observations / Volchugov P. A. [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – P. 889–893. – doi: 10.1134/S106287382571133X.

35 Spectrum and Composition of Primary Cosmic Rays, According to Data from the TAIGA-HiSCORE Array / Prosin V. V. [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – P. 907–912. – doi: 10.1134/S1062873825711663.

36 The TAIGA Experiment—Current Status, Recent Results, and Development Prospects / Budnev N. M. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88. – P. 232–241. –doi: 10.1134/S106377882570036X.

37 Status of the Scintillation Experiment of the TAIGA Astrophysical Complex / Kravchenko E. A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88. – P. 242–248. – doi: 10.1134/S1063778825600496.

38 Investigation of the Spatiotemporal Structure of Extensive Atmospheric Showers According to Data from the Tunka-Grande Array / Ivanova A. L. [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – P. 879–883. – doi: 10.1134/S106287382571164X.

39 Study of High-Altitude Coplanarity Phenomena in Super-High-Energy EAS Cores with a Thick Calorimeter / Mukhamedshin R. [et al.] // Particles. – 2025. – Vol. 8. – P. 74. – <https://doi.org/10.3390/particles8030074>.

40 Мухамедшин Р.А. Проблема компланарности потоков энергии в стволах ШАЛ // Ядерная физика. – 2025. – том 88. – № 5. – стр. 419.

41 Фон одиночных мюонов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе / М.М. Кочкаров [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2025. – Т. 89, № 6. – С. 905–909. – DOI: 10.31857/S0367676525060141.

42 Search for Neutrino Events on the Baksan Underground Scintillation Telescope in Coincidence with Gamma-Ray Bursts from Fermi GBM and Swift BAT/ I.B. Unatlokov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89, No. 6. – pp. 868–872. – <https://doi.org/10.1134/S1062873825711328>.

43 Хаердинов Н.С. Суточная волна приземного электрического поля «хорошей погоды» в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов // Известия РАН, Серия Физическая. – 2025. – Т. 89. №6. – С. 852–857; DOI: 10.31857/S036767652506.

A.2 Публикации, индексируемые Web of Science и Scopus

1. Safronov G. (for the Baikal-GVD collaboration) The status and astrophysics results of the Baikal-GVD neutrino telescope // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1161.– <https://doi.org/10.22323/1.501.1161>

2. Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope / R. Dvornicky [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1031. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1031>.

3. Towards neutrino astronomy with tracks at the Baikal-GVD // G. Safronov, [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1162. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1162>.

4. A new positioning system for the Baikal-GVD neutrino telescope / B.A. Shaybonov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1175. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1175>.

5. Monitoring of optical properties of deep waters of Lake Baikal in 2024 / B. Shaybonov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. –2025. – PoS ICRC2025. – P. 1176. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1176>.

6. Ultra-high energy neutrino flux limit from Baikal-GVD / M. N. Sorokovikov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1186. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1186>.

7. Probing the Galactic neutrino flux with Baikal-GVD / Z.A.M. Dzhilkibaev [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1197. – <https://doi.org/10.22323/1.501.1197>.

8. Online Analysis and Multimessenger Alerts Follow-Up at the Baikal-GVD Telescope / V.Dik [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 921. – <https://doi.org/10.22323/1.501.0921>.

9. Overview of the Baikal-GVD neutrino telescope: 2024 status / R. Dvornicky [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // EPJ Web Conf. – 2025. – RICAP24. – V.319. –P. 04002. – <https://doi.org/10.1051/epjconf/202531904002>.

10. Energy Spectrum of primary Cosmic Rays according to the data of the Tunka-Grande scintillation array. / Budnev N. M. [et al.] // PoS. – 2025. – Vol. ICRC2025. – P. 205. – doi: 10.22323/1.501.0205.

11. Energy spectrum and mass composition of cosmic rays according to the data of the TAIGA-HiSCORE installation / Budnev N. M. [et al.] // PoS. – 2025. – Vol. ICRC2025. – P. 206. – doi: 10.22323/1.501.0206.

12. Carpet-3 detection of a photon-like air shower with estimated primary energy above 100 TeV in a spatial and temporal coincidence with GRB 221009A / D. D. Dzhappuev [et al.] // Phys. Rev. D. – 2025. – 111. – 102005. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.102005> .

A.3 Статьи в журналах из списка ВАК

1 Safronov G. (for the Baikal-GVD collaboration) Resent results from the Baikal-GVD neutrino telescope // Moscow University Phys. Bull. – 2024. – Special Is.: 21st Lomonosov Conf. Elem. Part. Phys. –V.79. – P.210 // Published - 2025. – <https://link.springer.com/article/10.3103/S0027134924701674>.

2 Хаердинов Н.С. Модель генерации сейсмического электрического поля в атмосфере // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2025. В печати.

3 Комплексная ливневая установка “Ковер-3” Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Исследования в области гамма-астрономии / В.В. Петков [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ) – 2025. – Т. 56, № 3.

A.4 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

Khaerdinov N.S. // Model of seismic electric field generation in the atmosphere // XIV International Conference “Solar-terrestrial relations and physics of earthquakes precursors”, September 29 - October 3 2025 Paratunka Kamchatsky kray.

A.7 Иные публикации по теме

1 Measurement of the diffuse astrophysical neutrino flux over six seasons using cascade events from the Baikal-GVD expanding telescope / V.A. Allakhverdyan [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // e-Print: 2507.01893 [astro-ph]. – 2025. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.01893>.

2 Design and Implementation of the Fast Data Processing System for the Baikal-GVD Neutrino Telescope / V.A. Allakhverdyan [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // e-Print: 2511.03438 [astro-ph]. –2025. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.03438>.

3 Bezrukov L.B., Bykovsky A.S., Sinev V.V. Low metallicity solar model finds the prove in Borexino data [Электронный ресурс] // arXiv.org. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.13470> (дата обращения 08.05.2025).