

На правах рукописи

**Романенко
Виктор Сергеевич**

**Поиск источников космического
гамма–излучения сверхвысоких энергий на
установке «Ковер–3»**

01.04.16 —

«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Научный руководитель:

Петков Валерий Борисович, доктор физико–математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), заведующий филиалом Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.

Официальные оппоненты:

Кузьмичев Леонид Александрович, доктор физико–математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), лаборатория космического излучения высоких энергий, заведующий лабораторией.

Позаненко Алексей Степанович, кандидат физико–математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), отдел 64 «Прикладная и теоретическая астрономия и радиоинтерферометрия», ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «_____» _____ 2022 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук, по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте: <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
канд. физ.–мат. наук

С.В. Демидов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Гамма–астрономия сверхвысоких энергий переживала свой первый пик активности в 1980–х годах, когда впервые было зарегистрировано излучение от источника Лебедь X–3 [1, 2, 3] и вспышка в Крабовидной Туманности [4, 5, 6]. Впоследствии интерес к гамма–астрономии стал угасать. Значительным образом ситуация изменилась с развитием таких областей физики, как космомикрoфизика (Astroparticle Physics) и многоканальная астрономия (Multi–messenger astronomy), что позволило производить наиболее полные исследования астрофизических объектов и фундаментальных физических явлений, протекающих в них, на масштабах от микроскопических до космологических.

Исследования гамма–излучения сверхвысоких энергий – с энергией более 100 ТэВ – могут предоставить уникальную информацию об объектах нашей Галактики, ускоряющих заряженные частицы. Так как при взаимодействии этих частиц (которые могут быть ускорены до энергий около ПэВ) помимо прочих будут рождаться фотоны и нейтрино, имеющие свойство сохранять направления своего движения и не отклоняться в магнитных полях. Поэтому они могут долететь до Земли и быть зарегистрированными наземными установками, предоставляя ценную информацию о физических процессах, происходящих при энергиях, недостижимых в лабораторных условиях, и об источниках, в которых эти процессы протекают. Несмотря на большой прогресс в данной области [7, 8], поиск гамма–излучения сверхвысоких энергий представляет фундаментальный интерес не только для современной астрофизики, но и физики в целом.

Поиск внегалактического гамма–излучения сверхвысоких энергий представляет не меньший интерес, так как такое излучение может быть одним из намеков на новую физику. Это связано с тем, что фотоны с энергиями более 1 ТэВ не могут свободно распространяться во Вселенной. Взаимодействуя с микроволновым фоновым излучением путем рождения электрон–позитронной пары, первичные фотоны теряют свою энер-

гию и отклоняются от своих исходных направлений. Поэтому, исследуя потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий внегалактического происхождения, можно получить ценные ограничения на модели современной физики, например, аксион-фотонные переходы, или косвенно указать на их существование.

Дополнительный интерес к гамма-излучению сверхвысоких энергий резко возрос, начиная с 2013 года, в связи с результатами, полученными нейтринной обсерваторией IceCube, расположенной на Южном полюсе. Коллаборацией IceCube было доказано существование астрофизических нейтрино с энергиями более 30 ТэВ [9]. Причем, направления прихода этих нейтрино были изотропно распределены, что не позволяло отождествлять их с известными нам источниками. Как следствие, потоки нейтрино, полученные в эксперименте, не могли быть объяснены известными нам механизмами. Вскоре были предложены различные модели, в которых такие нейтрино могут рождаться в распадах заряженных π^\pm мезонов, образующихся при адронных и фото-адронных взаимодействиях. Эти распады должны сопровождаться нейтральными π^0 мезонами, распады которых, в свою очередь, должны внести вклад в потоки диффузного гамма-излучения сверхвысоких энергий. Поэтому исследование потоков диффузного гамма-излучения могут оказать значительное влияние на развитие моделей, описывающих происхождение астрофизических нейтрино. Несмотря на недавнее сообщение об открытии диффузного гамма-излучения [10], оно остается слабо изученным и требует подтверждения со стороны других установок.

Развитие методов многоканальной астрономии привело к созданию глобальных сетей обмена информацией между научными установками, например, наиболее популярными из них являются GCN [11] (The Gamma-ray Coordinates Network) и AMON [12] (Astrophysical Multimessenger Observatory Network). Они предоставили новую уникальную возможность исследовать пространственные и временные корреляции между событиями, зарегистрированными различными наземными и орбитальными экспериментами в режиме реального времени, и не только. Например, группой

«Ковер-3», одними из первых, была развита идея поиска пространственно-временных корреляций между астрофизическими нейтрино, зарегистрированными установкой IceCube, и фотоноподобными событиями. Как результат, была обнаружена потенциальная вспышка гамма-излучения сверхвысоких энергий в области Кокона Лебедя; максимум этой вспышки совпадал по времени с нейтрино, зарегистрированным из той же области. Дальнейшие поиски могут помочь продвинуться в понимании процессов рождения фотонов и нейтрино высоких энергий, а также источников, в которых эти процессы протекают.

Однако для эффективного выполнения представленных выше исследований необходимо создавать современные экспериментальные установки, которые могут решать большой ряд современных научных проблем. Именно с такой целью и было запланировано создание установки нового поколения «Ковер-3», предназначенной для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН (БНО ИЯИ РАН). Создание установки подразумевало модернизацию уже существующей установки «Ковер-2» — путем увеличения эффективных площадей наземной части установки и подземного мюонного детектора, а также создания новой системы сбора данных.

Цели и задачи работы

Основная цель настоящей работы – поиск гамма-излучения сверхвысоких энергий, а также создание новой установки по регистрации широких атмосферных ливней «Ковер-3». Для чего были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обеспечение стабильной работы установки «Ковер-2», проведение ремонта и технического обслуживания установки;
2. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных;
3. Расширение площади подземного мюонного детектора до 410 м².
Проведение пусконаладочных работ и обеспечение набора данных;

4. Расширение наземной части установки «Ковер-3» – путем создания новых выносных пунктов регистрации. Сборка счетчиков на основе пластического сцинтиллятора и укомплектование этими счетчиками выносных пунктов регистрации;
5. Разработка и создание новой системы сбора данных для наземной части установки «Ковер-3»;
6. Разработка онлайн программы для системы сбора данных установки «Ковер-3», обеспечение набора данных с целью диагностики электроники.

Научная новизна

В ходе выполнения работы в составе научной группы «Ковер-3» были разработаны новые методы исследования и поиска гамма-излучения сверхвысоких энергий, и получены новые научные результаты.

1. Разработан новый метод поиска пространственно-временных корреляций между кандидатами в фотоноподобные события на установке «Ковер-3» и нейтрино высоких энергий, зарегистрированных установкой IceCube;
2. Получены ограничения на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий от направлений прихода нейтринных событий – для двух режимов работы мюонного детектора установки «Ковер-3»;
3. С помощью разработанной методики на установке «Ковер-3» было зарегистрировано гамма-излучение сверхвысоких энергий, имеющее пространственную и временную корреляцию с нейтринным событием IceCube-201120A;
4. Разработаны новые методические и аппаратные решения для исследования гамма-излучения сверхвысоких энергий.

Научная и практическая значимость

Полученные методические и аппаратные разработки, а также научные результаты имеют высокую значимость для проведения работ в данной области исследования.

Полученные результаты по ограничению на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий от направлений прихода нейтринных событий могут быть использованы для ограничений различных моделей происхождения нейтрино.

Результаты по регистрации потенциальной вспышки гамма-излучения с энергией более 300 ТэВ из области Кокона Лебеда, имеющей пространственно-временную корреляцию с нейтринным событием IceCube-201120A, могут быть изучены другими научными установками, работающими в этой области энергий. Полученные значения для потока фотонов могут быть использованы для изучения процессов генерации такого излучения в потенциальных источниках.

Методика поиска пространственно-временных корреляций может быть применена другими научными группами для поиска потенциальных источников гамма-излучения сверхвысоких энергий. Дополнительно, этот подход может быть применен для анализа данных, полученных на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе – «Baikal-GVD».

Практическую ценность представляют разработанные автором система сбора данных установки «Ковер-3» и программное обеспечение, дающее возможность сбора, обработки и хранения данных. Данные разработки могут быть использованы при планировании новых экспериментов, направленных на регистрацию широких атмосферных ливней.

Положения, выносимые на защиту

1. Получены ограничения на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий от направлений прихода нейтрино высоких энергий, зарегистрированных установкой IceCube, и фотонов, зарегистрированных гамма обсерваторией HAWC;

2. Зарегистрирована потенциальная вспышка гамма-излучения в области энергий более 300 ТэВ, со статистической значимостью 3.1σ , из области Кокона Лебеда. Причем направление прихода зарегистрированных фотонов имеет пространственно-временную корреляцию с нейтринным событием IceCube-201120A;
3. Произведено увеличение площади подземного мюонного детектора до 410 м². Выполнены пусконаладочные работы, произведена настройка сцинтилляционных счетчиков, и запущен набор данных;
4. Произведено увеличение площади наземной части установки – путем создания новых выносных пунктов регистрации. Выполнена сборка и установка сцинтилляционных счетчиков, а также создание кабельной сети для подачи сигналов на систему сбора данных;
5. Разработана, собрана и запущена в режиме набора данных новая система сбора данных наземной части установки «Ковер-3»;
6. Разработана онлайн программа системы сбора данных наземной части установки «Ковер-3», обеспечивающая настройку, контроль работы, сбор и хранение экспериментальных данных.

Личный вклад автора

Основные положения, которые были представлены в диссертации и вынесены на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии.

1. Автор принимал активное участие в обработке и анализе экспериментальных данных и обсуждении результатов эксперимента. Проводил диагностику регистрирующей аппаратуры с целью поиска неисправностей в работе системы сбора данных. Участвовал в работах по ремонту и настройке оборудования, используемого в эксперименте, с целью поддержания его работы;

2. Автор активно участвовал в анализе экспериментальных данных и обсуждении результатов по обнаружению гамма-излучения сверхвысоких энергий от области Кокона Лебеда; полученные результаты (от имени группы «Ковер-3») были доложены автором на двух крупных Международных конференциях: «17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics» и «37th International Cosmic Ray Conference»;
3. Автор лично проводил пусконаладочные работы в подземном мюонном детекторе, включающие: проверку делителей напряжений ФЭУ, проверку низковольтных цепей питания временных дискриминаторов индивидуальных счетчиков, подключение питания к счетчику, и другие. Выполнялись работы по подготовке и запуску набора данных, с последующей диагностикой и устранением неисправностей;
4. В рамках расширения наземной части установки (совместно с инженерами группы «Ковер-3») производилась сборка счетчиков на основе пластического сцинтиллятора с последующим укомплектованием ими выносных пунктов регистрации. Принимал участие в проведении пусконаладочных работ выносных пунктов регистрации;
5. Лично автором была разработана система сбора данных наземной части установки «Ковер-3», описываемая в диссертации, а также производились ее монтаж и настройка. Для системы сбора данных была разработана онлайн программа на языке Си, которая обеспечивает настройку аппаратуры, сбор и хранение данных.

Методы исследования

Исследования, представленные в диссертации, выполнялись в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на установке по регистрации широких атмосферных ливней «Ковер-3». Обработка и анализ экспериментальных данных, полученных в эксперименте, производились с использованием численных и статистических методов. Методы многоканальной

астрономии были использованы для поиска пространственно–временных корреляций с событиями, зарегистрированными установками IceCube и HAWC. При разработке онлайн программы системы сбора данных установки «Ковер–3» применялся метод структурного программирования.

Степень достоверности и апробация результатов

В диссертационной работе автором представлены результаты поиска гамма–излучения сверхвысоких энергий, в частности, сообщается о регистрации фотоподобных событий от области Кокона Лебеда, имеющих пространственно–временную корреляцию с нейтрино, зарегистрированным установкой IceCube. Также приводятся результаты разработки новой системы сбора данных установки «Ковер–3».

Перечисленные выше результаты были лично доложены автором на Всероссийских и Международных конференциях:

1. Устный доклад на «17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics», 26 Августа – 3 Сентября 2021, Валенсия, дистанционный режим.
2. Устный доклад на «The 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics», 19–25 Августа, 2021, Москва, дистанционный режим.
3. Устный и постерный доклад на «37th International Cosmic Ray Conference», 12–23 Июля, 2021, Берлин, дистанционный режим.
4. Постерный доклад на 36 Всероссийской конференции по космическим лучам, 28 Сентября – 2 Октября, 2020, Москва, дистанционный режим.
5. Постерный доклад на «XXXV International Conference on Equations of State for Matter», 2–23 Марта, Терскол, 2021.

6. Устный доклад на «VIth CNRS thematic School of Astroparticle Physics», 25–30 Марта, Обсерватория Верхнего Прованса, Франция, 2019.
7. Устный доклад на «The Diversity of the Local Universe International Conference», 30 Сентября – 4 Октября, пос. Архыз, 2019.

Список публикаций по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации Романенко В.С. опубликованы в девяти печатных работах в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, в числе которых 4 статьи [13, 14, 15, 16] в российских рецензируемых журналах, 1 статья [17] в международном рецензируемом журнале, а также 4 статьи [18, 19, 20, 21] в материалах международных научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Общий объем работы 144 страницы, включая 51 рисунок и 8 таблиц. Библиография включает 116 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена астрофизике и гамма-астрономии сверхвысоких энергий. В **разделе 1.1** описывается история открытия космических лучей и широких атмосферных ливней, а также личный вклад Дмитрия Владимировича Скобельцина в эту область физики. Описываются три основные компоненты, входящие в состав широких атмосферных ливней (ШАЛ): адронная, электромагнитная и мюонная. Приводятся основные принципы разделения адронных и электромагнитных ШАЛ, регистрируемых наземными ливневыми установками.

В **разделе 1.2** приводится обзор ранних экспериментов по поиску гамма-излучения сверхвысоких энергий, а также рассмотрены основные результаты, полученные на этих установках. Среди результатов – наблюдение гамма-излучения сверхвысоких энергий от источника Лебедь ХЗ по данным трех установок: установки Кильского университета [1], установки «Ковер» [2], и японской установки на шахте Охья [3]. Описывается одновременное наблюдение вспышки гамма-излучения сверхвысоких энергий в Крабовидной Туманности 23 февраля 1989 года тремя наземными установками: «Ковер» [4], Kolar Gold Fields [5] и EAS-TOP [6]. Также в данном разделе приведены ограничения на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий по данным установок CYGNUS и CASA-MIA.

В **разделе 1.3** описывается современное состояние гамма-астрономии сверхвысоких энергий и влияние, оказанное на нее со стороны нейтринной астрофизики. Рассматриваются результаты нейтринной обсерватории IceCube по регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий. Согласно некоторым предложенным моделям, эти нейтрино должны сопровождаться фотонами схожих энергий, образующих диффузное гамма-излучение сверхвысоких энергий. Эти результаты послужили дополнительным стимулом к развитию гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

Описаны последние результаты, полученные установкой Tibet AS γ по регистрации фотонов с энергией более 100 ТэВ, и регистрации диффузного гамма-излучения. Приводятся результаты установки HAWC о регистрации гамма-излучения с энергиями от 1 до 100 ТэВ от Крабовидной Туманности и Кокона Лебеда. А также результат коллаборации LHAASO по обнаружению двенадцати так называемых ПэВатронов – галактических источников гамма-излучения сверхвысоких энергий.

Во **второй главе** приведено техническое описание установки «Ковер-2» Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН (в настоящее время часть новой установки «Ковер-3»), на которой регистрировались ШАЛ, и на основе полученных данных производился поиск гамма-излучения сверхвысоких энергий.

В **разделе 2.1** описана наземная часть установки – центральный детектор («Ковер»), состоящий из 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора, расположенных в виде квадрата со сторонами 20×20 счетчиков. Четыре выносных пункта регистрации (ВПП), каждый из которых состоит из 18 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора, расположенных в виде прямоугольника со сторонами 6×3 счетчиков. Стандартный счетчик на основе жидкого сцинтиллятора имеет размеры 70×70×30 сантиметров (длина×ширина×высота) и оборудован фотоэлектронным множителем ФЭУ-49Б. Также в разделе описан принцип работы системы сбора данных наземной части установки. Для каждого счетчика центрального детектора измеряется энерговыделение в относительных единицах – релятивистских частицах (р.ч.), соответствующее наиболее вероятному энерговыделению при прохождении через счетчик вертикальных мюонов. Анодные сигналы с 18 счетчиков – каждого ВПП – объединяются при помощи сумматоров и поступают в аппаратный зал для измерения относительных временных задержек между сработавшими ВПП, при прохождении фронта ливня через каждый ВПП.

В **разделе 2.2** описывается подземный мюонный детектор (МД) установки «Ковер-2», а также система сбора данных. МД состоит из 175 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, закрепленных

к потолку туннеля, расположенных в виде прямоугольника со сторонами 35×5 счетчиков. Каждый счетчик имеет форму усеченной пирамиды высотой 45 сантиметров, в основании которой находится четыре плиты пластического сцинтиллятора с размерами $50 \times 50 \times 5$ сантиметров (длина \times ширина \times высота), а в ее вершине фотоэлектронный умножитель ФЭУ-49Б; общая площадь счетчика составляет 1 м^2 . Все счетчики МД разделены на 5 модулей, по 35 счетчиков в каждом. Анодные сигналы со всех счетчиков каждого модуля суммируются, и суммарные сигналы с пяти модулей поступают на зарядо-цифровой преобразователь для измерения энерговыведения в МД – n_μ , измеряемом в р.ч.

В **третьей главе** описывается процедура восстановления параметров ливня, приводятся критерии отбора фотоноподобных событий, и результаты поиска гамма-излучения сверхвысоких энергий.

В **разделе 3.1** Описана процедура восстановления параметров ливня, таких как число частиц N_e в ливне, определяемое путем фитирования функции Нишимуры–Каматы–Грейзена, для фиксированного возраста $s=1$:

$$f(r) = \frac{5}{4\pi} \cdot \frac{N_e}{R_M^2} \cdot \left(\frac{r}{R_M}\right)^{-1} \cdot \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{-3.5},$$

где r – это расстояние от оси ливня до точки, в которой измерялась плотность частиц, R_M – Мольеровский радиус, равный 95 метрам. Число мюонов n_μ в МД определялось на основе показаний зарядо-цифровых преобразователей. Направление прихода ливня описывается зенитным θ и азимутальным φ углами, которые определяются на основе временных задержек между сработавшими ВПР при прохождении через них плоскости ливня. Для восстановления углов используется метод максимального правдоподобия в приближении плоского фронта ливня. Определяются критерии для первичного отбора событий, участвующих в дальнейшем анализе: 1) количество сработавших счетчиков в центральном детекторе («Ковер») ≥ 300 ; 2) число частиц N_e в ливне $\geq 10^4$; 3) горизонтальный угол $\theta \leq 40^\circ$; 4) число мюонов в МД $n_\mu > 1$ (до 2018 года) и $n_\mu \geq 0$ (после 2018 года). Последний критерий, касающийся числа мюонов, связан с работой системы сбора МД,

Набор данных	Энергия E_γ^0 фотонов	N_e^0	n_μ/N_e
1999 – 2011	≥ 1 ПэВ	$\geq 10^{5.03}$	$\leq 10^{-5.01}$
2018 – ...	≥ 300 ТэВ	$\geq 10^{4.6422}$	$\leq 10^{-5.90688}$

Таблица 1: Значения критерия для отбора кандидатов в фотоподобные события, зарегистрированные на установке «Ковер–2», для двух наборов данных.

которая была изменена с целью повышения эффективности регистрации фотонных ШАЛ.

Для каждого набора данных (с разными режимами работы системы сбора данных МД) определялись свои величины для критериев отбора фотонных кандидатов. Критерии для отбора фотонных кандидатов определялись двумя параметрами: минимальным числом частиц N_e^0 в ливне, характеризующим пороговую энергию первичной частицы, и величиной n_μ/N_e , характеризующей отношение мюонной компоненты ШАЛ к электромагнитной. Значение соотношения n_μ/N_e , используемое для отбора фотоподобных событий, определялось на основе так называемой "фотонной медианы". С учетом результатов моделирования установки вычислялись соотношения n_μ/N_e для фотонных ливней и определялось их медианное значение, рисунок 1, которое и являлось критерием отбора фотоподобных событий; численные значения n_μ/N_e приведены в таблице 1. Таким образом, все зарегистрированные установкой события с числом частиц больше N_e^0 и величиной n_μ/N_e меньше полученного медианного значения рассматривались в эксперименте как фотоподобные события.

В разделе 3.2 развивается идея поиска фотоподобных событий, имеющих пространственную и временную корреляцию с оповещениями нейтринной обсерватории IceCube и гамма-обсерватории HAWC (1 – 300 ТэВ), а также представлены результаты поиска пространственно-временных корреляций.

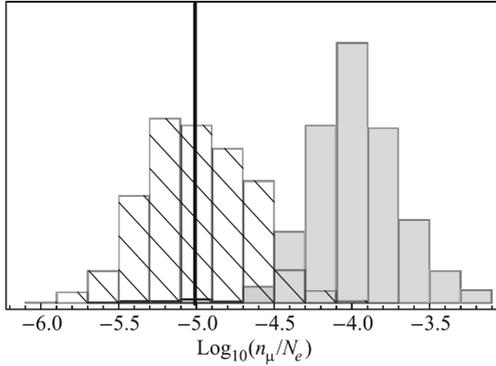


Рис. 1: Распределение n_{μ}/N_e для данных до 2018 года. Сплошные столбцы соответствуют экспериментальным данным, штрихованные столбцы соответствуют распределению для фотонов, полученных с помощью Монте-Карло моделирования. Вертикальная черта соответствует медианному значению n_{μ}/N_e – величине критерия отбора фотонных кандидатов.

Для данных, полученных установкой «Ковер-2» в период с 1999 по 2011 год, первичным критерием отбора удовлетворяло 115821 событие, из них критерием отбора фотоподобных событий удовлетворяло 523 события. Так как установка IceCube не производила набор данных в этот период времени, выполнялся поиск только пространственных корреляций с фотоподобными событиями, области локализации нейтринных событий рассматривались как потенциальные источники гамма-излучения сверхвысоких энергий. Всего для поиска совпадений было отобрано 34 нейтринных события, направления на которые находились в поле зрения установки за указанный период. Поиск совпадений с фотоподобными событиями производился в области пространства радиусом 3° , с центром в потенциальном источнике. По результату поиска превышения числа событий из областей пространства, связанных с нейтринными событиями, над ожидаемым фоном не обнаружено. Это позволило установить ограничения на величину

потока гамма-излучения с энергией более 1 ПэВ от этих направлений:

$$I_{\gamma}(E_{\gamma} \geq 1 \text{ ПэВ}) < 1.06 \times 10^{-14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

С 2011 года из-за поломки системы сбора данных наземной части установки набор данных на установке не производился. Однако некоторое количество данных было получено в период с 2016 по март 2018 года. Одно нейтринное событие [25] – в момент его регистрации нейтринной обсерваторией IceCube 10 декабря 2016 года – находилось в поле зрения установки «Ковер-2», и набор данных производился. Из области радиусом 3° с центром в нейтринном событии в течение ± 1 день не было зарегистрировано ни одного фотоподобного события, при ожидании 0.002 события, полученного из моделирования. На основании чего было установлено ограничение на флюенс вспышки потенциального источника нейтрино, для фотонов с энергией более 1 ПэВ: $< 5.4 \times 10^{-5}$ ПэВ/см². Полученные результаты опубликованы в работе [13].

С 7 апреля 2018 года мюонный детектор установки «Ковер-2» начал набор данных с числом регистрируемых мюонов $n_{\mu} \geq 0$, что позволило снизить пороговую энергию фотонов до 300 ТэВ, и повысить эффективность регистрации фотонных ливней. Анализ (схожий с тем, что был представлен выше) проводился и для нового набора данных установки, который составил 675 дней набора. Из этого набора данных первичный отбор прошло 52791 событие, а фотоподобных событий с $E_{\gamma} \geq 300$ ТэВ отобрано 598. Одновременный анализ и направления, и времени прихода события позволили снизить фон космических лучей и дополнительно отобрать фотоподобные события с энергией $E_{\gamma} \geq 100$ ТэВ. Таких событий отобрано 1021.

Для поиска совпадений с фотоподобными событиями использовались два типа событий - 1) нейтринные события, зарегистрированные установкой IceCube, и 2) оповещения гамма-обсерватории HAWC. Всего было отобрано 22 события, зарегистрированных установкой IceCube, и 9 событий, зарегистрированных установкой HAWC. Для каждого из 22 событий выполнялся поиск совпадений с фотоподобными событиями на установке

"Ковер–2" в двух временных интервалах: 24 часа и 30 суток с центром согласно времени прихода события. Превышения зарегистрированных фотоподобных событий над ожидаемым фоном не было обнаружено для обоих временных интервалов.

Были установлены ограничения на потоки и флюенс гамма–излучения с энергией более 100 ТэВ для каждого из 31 события, а также значения общего потока и флюенса для 9 событий НАВС и 22 событий IceCube; результаты были опубликованы в работе [14].

В разделе 3.3 описывается наблюдение возможной вспышки из области Кокон Лебедя, которая имела временную и пространственную корреляцию с нейтринным событием IceCube–201120A [26].

20 ноября 2020 года было зарегистрировано нейтринное событие IceCube–201120A с энергией 154 ТэВ; в области локализации нейтрино находилось несколько потенциальных источников из каталога 4FGL, орбитального гамма–телескопа Fermi–LAT. Самыми близкими потенциальными источниками являются Кокон Лебедя, Лебедь X–3, и пульсар PSR J2032+4127, образующий двойную систему со звездой MT91 213 класса Ве. Предварительный поиск фотоподобных событий из области локализации нейтринного события в пределах ± 12 часов не показал ни одного события. При увеличении области поиска до ± 15 суток было обнаружено два фотоподобных события.

После накопления большего количества данных был произведен анализ зарегистрированных событий из области локализации события IceCube–201120A. За период с 7 апреля 2018 года по 27 апреля 2021 года было накоплено 829 дней набора данных. Поиск событий производился в области пространства радиусом 4.7° с центром в источнике Кокон Лебедя (4FGL J2028.6+4110e). В указанном временном интервале из исследуемой области было обнаружено 346 событий с энергией более 300 ТэВ, причем 5 из них соответствовали критериям отбора фотонных кандидатов. Для поиска наилучшего соотношения сигнал–шум и оценки статистической значимости возможной вспышки производилось варьирование ширины временного окна относительно времени прихода нейтринного события. Для

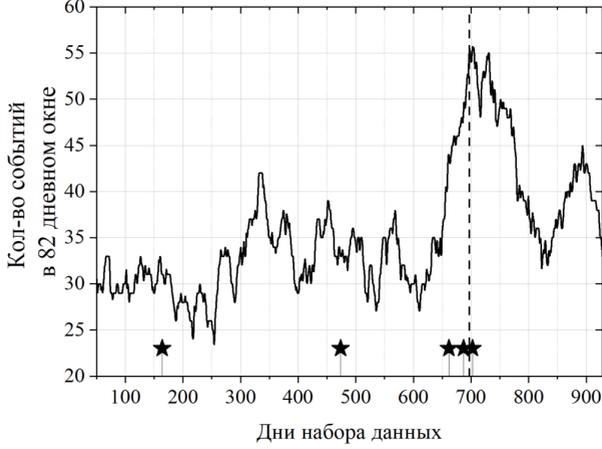


Рис. 2: Распределение всех событий во временном интервале шириной 82 дня. Звездами показаны дни прихода фотонных кандидатов. Вертикальная пунктирная линия соответствует времени прихода нейтрино, 20 ноября 2020 г.

учета возможных статистических флуктуаций, возникающих при варьировании временного окна, вводилась поправка на основе Монте–Карло. В результате, наилучшие соотношения сигнал–шум возможной вспышки достигались при двух временных окнах: 1) окно, равное 82 дням – для всех событий, и 2) окно, равное 70 дням – для фотонных кандидатов; рисунок 2.

После учёта возможных статистических флуктуаций оцениваемая вероятность возможной вспышки для всех событий равнялась $p = 1.5 \times 10^{-3}$, что соответствует достоверности 3.17σ , а вероятность для фотоподобных событий $p = 1.1 \times 10^{-2}$, что соответствует 2.55σ соответственно. В предположении вспышки был получен поток и флюенс гамма–излучения с энергией более 300 ТэВ от исследуемой области Кокона Лебеда:

$$I_{\gamma}(E_{\gamma} > 300 \text{ ТэВ}) = (5.6 \pm 1.8) \times 10^{-12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$F_{\gamma}(E_{\gamma} > 300 \text{ ТэВ}) = 13 \pm 4 \text{ ГэВ} \cdot \text{см}^{-2}.$$

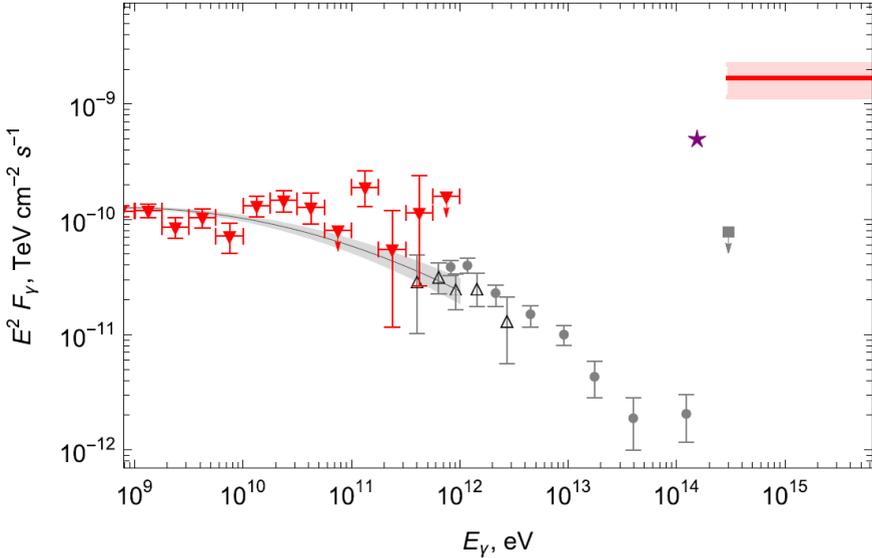


Рис. 3: Спектральное распределение энергии для Кокона Лебеда с энергией выше 1 ГэВ. Серый цвет (усредненные по времени значения): линия – поток по данным Fermi-LAT [22]; полый треугольник – данные эксперимента ARGO [23], круги – данные эксперимента HAWC [24]; квадрат – данные, полученные в текущем анализе. Красный цвет (значения в предположении вспышки): треугольники – получены на основе публичных данных Fermi-LAT; линия – данные, полученные в текущем анализе. Фиолетовая звезда – оценка флюенса нейтринного события IceCube-201120A.

Полученные значения для потока и флюенса – в сравнении с другими установками – показаны на рисунке 3, а результат был опубликован в работе [17].

Четвертая глава посвящена техническому описанию установки «Ковер–3», схема которой изображена на рисунке 4.

В **разделе 4.1** описано текущее состояние наземной части установки, которая помимо установки «Ковер–2» включает 39 новых выносных пунктов регистрации (ВПП); 28 из этих пунктов готовы к работе. Каждый новый ВПП состоит из девяти счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, расположенного в виде квадрата 3×3 с общей эффективной площадью 9 м^2 . Счетчики располагаются в специально построенных помещениях, сделанных из сэндвич–панелей толщиной 5 сантиметров. Анодные сигналы с каждого счетчика поступают на сумматор аналоговых сигналов, расположенный в помещении ВПП, а итоговый сигнал поступает в аппаратный зал на систему сбора данных.

В **разделе 4.2** описывается подземный мюонный детектор (МД) установки «Ковер–3» общей площадью 410 м^2 . В МД входят 175 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, входящие в состав установки «Ковер–2», а также 235 новых счетчиков. Каждый новый счетчик оборудован временным дискриминатором с плавающим порогом, обеспечивающим точную временную привязку при срабатывании счетчика. Это позволяет производить более точный подсчет сработавших счетчиков при прохождении атмосферных ливней через мюонный детектор.

В **разделе 4.3** приводится описание системы сбора данных наземной части и подземного мюонного детектора установки «Ковер–3». Для расширенной наземной части установки была разработана и собрана новая система сбора данных на основе оборудования фирмы CAEN. В крейт VME8100/00 устанавливаются четыре 16 канальных временных дискриминатора с плавающим порогом (модель V816), которая обеспечивает точную временную привязку в диапазоне амплитуд от 5 мВ до 5 В. Измерение относительных временных задержек производится при помощи время–цифровых преобразователей V1190В. Для измерения энерговыделения ис-

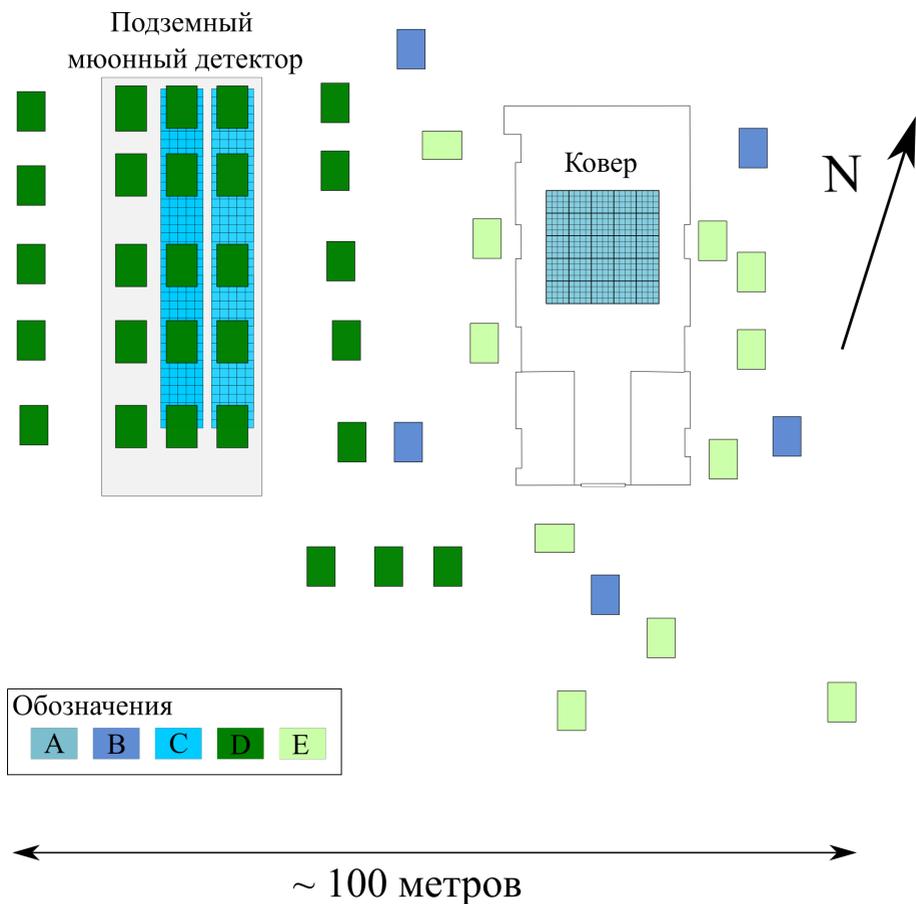


Рис. 4: Схема установки «Ковер-3». Условные обозначения: (A) установка «Ковер» – 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора; (B) старые выносные пункты на основе жидкого сцинтиллятора; (C) подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора; новые выносные пункты регистрации на основе пластического сцинтиллятора: (D)–готовые к работе, (E)–в стадии укомплектования.

пользуются аналого–цифровые преобразователи, модель V1742. Для выработки управляющего сигнала (триггера) и временной привязки к абсолютному времени предусмотрен программируемый логический блок V2495. Для связи с компьютером используется крейт-контроллер V2718. Для перечисленного оборудования была разработана онлайн программа на языке Си, обеспечивающая настройку, контроль за работой установки и сбор данных. В подземном мюонном детекторе обеспечен сбор данных с общей площади 410 м².

В **Заключении** перечислены основные результаты работы и выражены благодарности автора.

Список литературы

- [1] Samorski M., Stamm W. Detection of 2×10 to the 15th to 2×10 to the 16th eV gamma-rays from Cygnus X-3 //The Astrophysical Journal. – 1983. – Т. 268. – С. L17–L21.
- [2] Alexeenko V. V. et al. Cygnus X-3 observation in gamma-ray energy range $>10^{14}$ eV //Il Nuovo Cimento C. – 1987. – Т. 10. – №. 2. – С. 151-161.
- [3] Muraki Y. et al. Observations of ultra-high-energy photons from Cygnus X-3 //The Astrophysical Journal. – 1991. – Т. 373. – С. 657–664.
- [4] Alexeenko V. V. et al. The ultra-high energy gamma-ray burst from the Crab Nebula observed by the Baksan EAS array //Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 1992. – Т. 18. – №. 4. – С. L83.
- [5] Acharya B. S. et al. First simultaneous detection of PeV energy burst from the Crab Nebula //Nature. – 1990. – Т. 347. – №. 6291. – С. 364-365.
- [6] Aglietta M. et al. Detection of the UHE burst from the Crab Nebula on February 23, 1989, from the EAS-TOP array //EPL (Europhysics Letters). – 1991. – Т. 15. – №. 1. – С. 81.
- [7] Amenomori M. et al. First detection of photons with energy beyond 100 TeV from an astrophysical source //Physical review letters. – 2019. – Т. 123. – №. 5. – С. 051101.
- [8] Cao Z. et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources //Nature. – 2021. – Т. 594. – №. 7861. – С. 33-36.
- [9] Aartsen M. G et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector //Science. – 2013. – Т. 342. – №. 6161. – С. 1242856.
- [10] Amenomori M. et al. First detection of sub-PeV diffuse gamma rays from the Galactic disk: Evidence for ubiquitous galactic cosmic rays beyond PeV energies //Physical Review Letters. – 2021. – Т. 126. – №. 14. – С. 141101.

- [11] GCN: The Gamma-ray Coordinates Network (TAN: Transient Astronomy Network). — Текст : электронный // GCN : [сайт]. — URL: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 23.05.2022).
- [12] Smith M. W. E. et al. The astrophysical multimessenger observatory network (AMON) // *Astroparticle Physics*. — 2013. — Т. 45. — С. 56-70.
- [13] Dzhappuev D. D., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Ptitsyna K. V., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Yanin A. F. and Zhezher Ya. V. Carpet-2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events // *JETP Letters*. — 2019. — Т. 109. — №. 4. — С. 226-231.
- [14] Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlokov I. B., Yanin A. F., Zhezher Ya. V. and Zhuravleva K. V. Carpet—2 Search for Gamma Rays above 100 TeV in Coincidence with HAWC and IceCube Alerts // *JETP Letters*. — 2020. — Т. 112. — №. 12. — С. 753-756.
- [15] Романенко В. С., Петков В. Б., Лидванский А. С. Гамма-астрономия сверхвысоких энергий на установке «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН // *ЖЭТФ*. — 2022. — Т. 161. — №. 4. — С. 523-532.
- [16] Романенко В. С., Петков В. Б., Афашоков Ю. З., Горбачева Е. А., Джаппуев Д. Д., Дзапарова И. М., Жежер Я. В., Журавлева К. В., Каршиков И. С., Куджаев А. У., Клименко Н. Ф., Куреня А. Н., Лидванский А. С., Михайлова О. И., Рубцов Г. И., Троицкий С. В., Унатлоков И. Б., Хаджиев М. М., Янин А. Ф. Эксперимент “Ковер-3”: поиск гамма-излучения сверхвысокой энергии от астрофизических объектов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85. — №. 4. — С. 545-547.

- [17] Dzhappuev D. D., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhatdov T. A., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Podlesnyi E. I., Romanenko V. S., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlov I. B., Vaiman I. A., Yanin A. F., Zhezher Ya. V. and Zhuravleva K. V. Observation of Photons above 300 TeV Associated with a High-energy Neutrino from the Cygnus Region //The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – T. 916. – №. 2. – C. L22.
- [18] Romanenko V. S. Carpet-2 observation of $E > 300$ TeV photons accompanying a 150 TeV neutrino from the Cygnus Cocoon //Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference–PoS. – 2021. – T. ICRC 2021. – C. 849.
- [19] Romanenko V. S., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhappuev D. D., Dzhatdov T. A., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Petkov V. B., Podlesnyi E. I., Rubtsov G. I., Unatlov I. B., Vaiman I. A., Yanin A. F., Zhezher Ya. V. and Zhuravleva K. V. Searches for sub-PeV photons in coincidence with neutrinos //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 2156. – №. 1. – C. 012097.
- [20] Romanenko V. S. The Carpet-3 EAS array: the current status // Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference–PoS. – 2021. – T. ICRC 2021. – C. 275.
- [21] Romanenko V. S., Petkov V. B., Dzhappuev D. D., Lidvansky A. S., Gorbacheva E. A., Dzaparova I. M., Kudzhaev A. U., Klimenko N. F., Kurenya A. N., Mikhailova O. I., Mikhailova O. I., Khadzhiev M. M., Troitsky S. V., Yanin A. F., Zhuravleva K. V. Carpet-3 experiment for ultrahigh-energy astrophysics: Current-state and prospects //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 1787. – №. 1. – C. 012038.

- [22] Abdollahi S. et al. Fermi large area telescope fourth source catalog //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2020. – Т. 247. – №. 1. – С. 33.
- [23] Bartoli B. et al. Identification of the TeV gamma-ray source ARGO J2031+4157 with the Cygnus Cocoon //The Astrophysical Journal. – 2014. – Т. 790. – №. 2. – С. 152.
- [24] Abeysekara A. U. et al. HAWC observations of the acceleration of very-high-energy cosmic rays in the Cygnus Cocoon //Nature astronomy. – 2021. – Т. 5. – №. 5. – С. 465-471.
- [25] AMON ICECUBE_EHE Event Information. —
Текст : электронный // GCN : [сайт]. — URL:
https://gcn.gsfc.nasa.gov/notices_amon/80127519_128906.amon (дата обращения: 23.05.2022).
- [26] IceCube-201120A: IceCube observation of a high-energy neutrino candidate event. — Текст : электронный // GCN : [сайт]. — URL: <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn/gcn3/28927.gcn3> (дата обращения: 28.05.2022).

Научное издание

Романенко Виктор Сергеевич

Поиск источников космического гамма-излучения
сверхвысоких энергий на установке «Ковер-3»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60×84/16 Уч.-изд.л. 1.5 Зак. № 125

Тираж 70 экз.

Печать цифровая

Типография «ПРИНТ ЦЕНТР»

360015, г. Нальчик, улица Братьев Кушховых, 79а