

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Петков Валерий Борисович

Москва — 2022

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Астрофизика и гамма–астрономия сверхвысоких энергий	15
1.1 История открытия и методы регистрации космического излучения сверхвысокой энергии	15
1.1.1 Открытие космических лучей	15
1.1.2 Открытие широких атмосферных ливней	20
1.1.3 Разделение адронных и электромагнитных ШАЛ	21
1.2 Обзор ранних экспериментов и их результатов по поиску гамма–излучения сверхвысоких энергий	29
1.2.1 Установки для регистрации гамма–излучения сверхвысоких энергий	29
1.2.2 Наблюдение излучения от Лебедь X–3	38
1.2.3 Наблюдение вспышки в Крабовидной Туманности	43
1.2.4 Ограничения на потоки гамма–излучения сверхвысоких энергий	47
1.3 Современное состояние гамма–астрономии сверхвысоких энергий	50
1.3.1 Гамма–астрономия сверхвысоких энергий и нейтринная астрофизика	50
1.3.2 Открытие галактических ПэВатронов	51
1.3.3 Регистрация диффузного гамма–излучения	58
Глава 2. Установка «Ковер–2» БНО ИЯИ РАН	62
2.1 Наземная часть установки	62

2.1.1	Счетчик на основе жидкого сцинтиллятора	64
2.1.2	Управляющий сигнал “Мастер”	66
2.1.3	Система сбора данных	68
2.2	Подземный мюонный детектор	70
2.2.1	Счетчик на основе пластического сцинтиллятора	71
Глава 3. Поиск гамма—излучения сверхвысоких энергий		73
3.1	Критерии отбора фотонных кандидатов	73
3.1.1	Восстановление параметров ШАЛ	73
3.1.2	Критерии отбора фотоноподобных событий	76
3.2	Поиск совпадений фотонов сверхвысоких энергий с оповещениями IceCube и HAWC	79
3.3	Наблюдение вспышки гамма—излучения сверхвысоких энергий из области Кокона Лебеда	87
Глава 4. Ливневая установка нового поколения «Ковер–3»		96
4.1	Наземная часть установки	96
4.2	Мюонный детектор большой площади	99
4.3	Система сбора данных	103
4.3.1	Система сбора данных наземной части установки	103
4.3.2	Система сбора данных мюонного детектора	114
Заключение		119
Список сокращений и условных обозначений		122
Список литературы		123
Список рисунков		137
Список таблиц		144

Введение

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), 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 нашей галактики. 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 источниках, в которых они 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 энергию 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–фотонных переходов 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 исследования по поиску 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 фотонопоподобными событиями. Как результат, была обнаружена потенциальная вспышка гамма-излучения сверхвысоких энергий в области Кокона Лебедя, максимум которой 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 они протекают.

Однако для эффективного выполнения представленных выше исследований необходимо создавать современные экспериментальные установки, которые могут решать широкий круг современных научных проблем. Именно с такой целью и было запланировано создание установки нового поколения «Ковер-3», в Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН (БНО ИЯИ РАН), предназначенной для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Создание установки подразумевало модернизацию уже существующей установки «Ковер-2», путем увеличения эффективной площади 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 её ремонта и технического обслуживания;
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 ими 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 фотоподобные события 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;
3. С помощью разработанной методики 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-излучение сверхвысоких энергий от направлений прихода нейтринных событий, могут быть использованы для ограничений различных моделей происхождения происхождения нейтрино.

Результаты по регистрации потенциальной вспышки гамма-излучения с энергией более 300 ТэВ из области Кокона Лебеда, имеющей пространственно-временную корреляцию нейтринным событием IceCube-201120A, могут быть изучены другими научными установками, работающими этой в 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 представляет разработанная автором система сбора данных установки «Ковер-3» и программное обеспечение, обеспечивающее сбор, обработку и хранение 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, имело 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, а также полученные результаты, от имени группы «Ковер-3», были доложены 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 работах выносных пунктов регистрации;
5. Лично автором была разработана система сбора данных наземной части установки «Ковер-3», описываемая в диссертации, а также производилась 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 ста-

тистических 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 все-российских 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 доклады 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 Univers 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 статьи [17] в международном рецензируемом журнале, а также 4 статьи [18, 19, 20, 21] в материалах международных научных конференций.

1. **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. DOI: 10.31857/S004445102204006X.
Перевод: **Romanenko V. S.**, Petkov V. B., Lidvansky A. S. Ultra-High Energy Gamma Ray Astronomy with the Carpet Air Shower Array at the Baksan Neutrino Observatory // *JETP*. – 2022. – Т. 134. – №. 4. – С. 440–448. DOI: 10.1134/S1063776122040094.
2. 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., Unatlokov 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. – Т. 916. – №. 2. – С. L22. DOI: 10.3847/2041-8213/ac14b2.
3. 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. DOI: 10.1134/S0021364020240029.
4. 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. DOI: 10.1134/S0021364019040015.
 5. **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. – Т. ICRC 2021. – С. 849. DOI: 10.22323/1.395.0849.
 6. **Romanenko V. S.** The Carpet–3 EAS array: the current status // *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference–PoS*. – 2021. – Т. ICRC 2021. – С. 275. DOI: 10.22323/1.395.0275.
 7. **Романенко В. С.**, Петков В. Б., Афашоков Ю. З., Горбачева Е. А., Джаппуев Д. Д., Дзапарова И. М., Жежер Я. В., Журавлева К. В., Карпиков 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. DOI: 10.31857/S0367676521040335.
- Перевод: **Romanenko V. S.**, Petkov V. B., Afashokov Yu. Z., Dzaparova I. M., Dzhappuev D. D., Gorbacheva E. A., Karpikov I. S., Khadzhiev M. M., Klimenko N. F., Kudzhaev A. U., Kurenya A. N., Lidvansky A. S., Mikhailova O. I., Rubtsov G. I., Troitsky S. V., Unatlokov I. B., Yanin A.

- F., Zhezher Ya. V. and Zhuravleva K. V. Carpet–3 Experiment: Searching for Extrahigh-Energy Gamma Rays from Astrophysical Objects // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2021. – Т. 85. – №. 4. – С. 412–414. DOI: 10.3103/S1062873821040328.
8. **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., Kurenaya 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. – Т. 2156. – №. 1. – С. 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/2156/1/012097.
9. **Romanenko V. S.**, Petkov V. B., Dzhappuev D. D., Lidvansky A. S., Gorbacheva E. A., Dzaparova I. M., Kudzhaev A. U., Klimenko N. F., Kurenaya 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. – Т. 1787. – №. 1. – С. 012038.

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.

1. Астрофизика и гамма–астрономия сверхвысоких энергий

1.1 История открытия и методы регистрации космического излучения сверхвысокой энергии

1.1.1 Открытие космических лучей

Впервые с влиянием космическим лучей столкнулся Шарль Кулон в 1785 году в своих опытах с электроскопом. Он заметил, что прибор самопроизвольно разряжается, и это не было связано с дефектами прибора. Позже в 1835 году Майкл Фарадей подтвердил наблюдения, сделанные Кулоном, используя более качественный изоляционный материал. Следующие немаловажные наблюдения были сделаны Кано Маттеуччи в 1850 году и Уильямом Круксом в 1879 году. Было установлено, что скорость самопроизвольного разряда уменьшается при более низком атмосферном давлении. Попытки объяснить эти наблюдения были одним из первых шагов к открытию космических лучей.

После открытия явления радиоактивного распада Анри Беккерелем в 1896 году и радия Пьером и Марией Кюри в 1898 году было установлено, что в присутствии радиоактивного образца хлорида радия заряженный электроскоп разряжается. Впоследствии скорость разряда электроскопа использовалась для измерения уровня радиоактивности.

Первым попытку выяснить источник происхождения ионизирующего излучения в 1900–1903 годах, во время своего обучения в Берлинском университете, совершает Франц Линке. Он выполняет 12 полетов на воздушном шаре. Первое измерение ионизации было сделано на высоте 1000 метров и ее значение было ниже, чем на поверхности Земли. Ионизация на высотах между 1000 и 3000 метров была одинакова, а на больших высотах это значение увеличи-

валось, вплоть до четырех раз на высоте 5500 метров. Однако Линке делает неправильный вывод из своих измерений утверждая, что причину ионизации нужно искать сначала в Земле.

Измерения с электроскопом на различных высотах продолжил Теодор Вульф. Он усовершенствовал электроскоп, достигнув чувствительности один вольт, и сделал их портативными. Измерения проводились на Эйфелевой башне, на высоте около 300 метров. Целью измерений был поиск источника излучения: если им является Земля, то интенсивность излучения должна экспоненциально уменьшаться с высотой. Измерения действительно показали уменьшение интенсивности излучения, однако, оно было недостаточным и не согласовалось с расчетами, но общий вывод был сделан в пользу излучения, исходящего от Земли. Тогда Теодор Вульф еще не знал, что собственная радиоактивность Эйфелевой башни повлияла на его измерения.

Результаты Вульфа дали понять, что необходимы дополнительные эксперименты с воздушными шарами для изучения ионизации на больших высотах. Такое измерение было выполнено в 1909 году Карлом Бергвицем. Он обнаружил, что на высоте 1300 метров ионизация снизилась на 24% относительно Земли, но результаты его измерений были поставлены под сомнение из-за поврежденного во время полета электроскопа. Позже, исследовав свои электроскопы, он заявил, что значительных превышений ионизации на высоте не наблюдал. Через несколько месяцев Альберт Гоккель совершил полеты, проведя измерения на высотах вплоть до 3000 метров, рисунок 1.1, он подтвердил что ионизация не уменьшается с высотой, как это предсказывает теория излучения Землей. Он делает верный вывод о том, что источником ионизации не являются радиоактивные элементы в верхних слоях Земли. Также он первым вводит термин “космическое излучение” (“kosmische strahlung”) в своей совместной с Теодором Вульфом работе [22]

Следующий важный эксперимент провел итальянский метеоролог и физик Доменико Пачини. Он измерял скорость ионизации в горах на различных

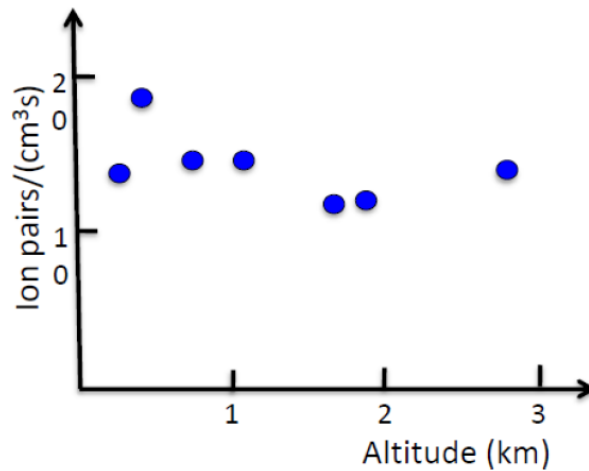


Рисунок 1.1 — Альберт Гоккель (слева) и результаты его измерений (справа).

высотах и на уровне моря в нескольких километрах от Ливорно, в результате им было обнаружено снижение скорости ионизации на 30%. В 1910 году Виктор Гесс, цитируя работы Пачини говорит, что результаты его измерений нельзя объяснить, исходя из гипотезы Земного происхождения ионизирующего излучения. В своем заключающем эксперименте Пачини погружал электроскоп на глубину три метра в море в Ливорно, а потом в озеро Браччано; в результате им было обнаружено значительное снижение ионизации – около 20% при статистической значимости 4.3σ . Перевод оригинальной статьи Пачини можно найти в работе [23]. Несмотря на достаточно уверенное доказательство происхождения ионизирующего излучения открытие космических лучей принадлежит не Доменико Пачини.

Точку в этом вопросе поставил австриец Виктор Гесс (1883–1964), он начал с изучения электроскопов Теодора Вульфа и измерения коэффициентов поглощения ионизирующего излучения в воздухе. В 1911 году Гесс совершает два полета на аэростате на высоту до 1300 метров, однако, измерения не выявили значимого изменения в радиоактивности. Для измерений использовались электроскопы Вульфа, помещенные в цинковые коробки разной толщины. Вторая серия полетов была совершена с апреля по август 1912 года. Всего было совершено семь полетов на аэростате, и в последнем полете 7 августа была

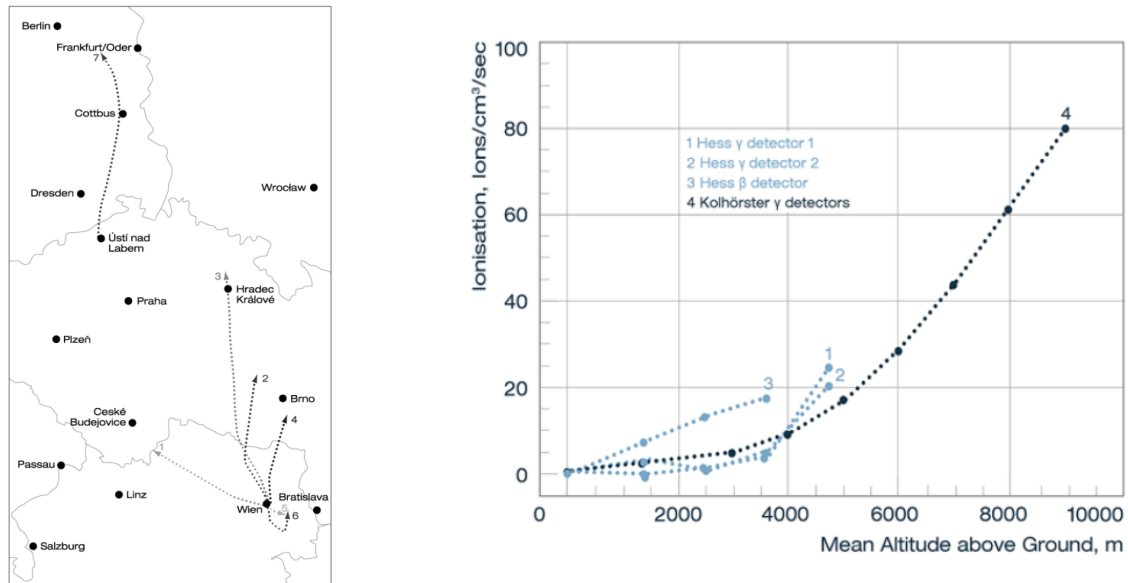


Рисунок 1.2 — Слева: маршруты полетов Виктора Гесса. Справа: ионизация, измеренная в 7-м высотном полете Гесса (1912 г.) и в полете Кольхерстера (1914 г.).

достигнута максимальная высота 5000 метров. Результаты полетов Гесса показали, что ионизация до высоты примерно 3000 метров меняется незначительно, однако, преодолев эту высоту ионизация начинает стремительно возрастать. Виктор Гесс пришел к выводу, что увеличение ионизации с высотой происходит из-за излучения, идущего сверху, и считал, что это излучение имеет внеземное происхождение [24]. На рисунке 1.2 показана схема полетов Гесса и результаты измерений 7 полета. Результаты Гесса позже были подтверждены Кольхёрстером в ряде полетов на высоты до 9200 метров. Было обнаружено увеличение ионизации до 10 раз относительно уровня моря, результат показан на рисунке 1.2. За свои измерения Виктор Гесс был удостоен нобелевской премии по физике 1936 года с формулировкой «За открытие космических лучей».

Отдельно хотелось бы выделить вклад российского ученого Дмитрия Владимировича Скобельцына по наблюдению частиц космических лучей. В 1927 году изучая эффект Комптона, Д. В. Скобельцин наблюдал треки релятивистских частиц в камере Вильсона. Им были обнаружены частицы высоких энергий, которые не могли образовываться в результате радиоактивного распада, также

The first recognizable cosmic-ray particles in cloud-chamber photographs

Plates 27, 28 and 29. D. SKOBELEZYN, Leningrad, Z. Phys. 54, 686 (1929).

Among photographs obtained in a small horizontal cloud chamber, tracks of particles suffering little deflection in a magnetic field of 1,500 gauss were recorded. These tracks were not associated in direction with the radioactive source under investigation, and indeed were predominantly in directions well removed from the horizontal plane. The author identified these tracks with particles arising from cosmic rays—"Diese β -Strahlen sind als von den Hessischen Ultra- γ -Strahlen erzeugte sekundäre Elektronen zu deuten" and estimated the flux of particles across a horizontal surface to be $1.2 \text{ cm.}^{-2} \text{ min.}^{-1}$, a value which may be compared with a recent estimate [Rossi, Rev. Mod. Phys. 20, 539 (1948)]. $1.79 \times 10^{-8} \text{ cm.}^{-2} \text{ sec.}^{-1} = 1.07 \text{ cm.}^{-2} \text{ min.}^{-1}$.

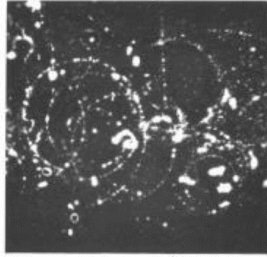


Plate 27 shows a single cosmic ray particle which was not significantly deflected in the magnetic field.

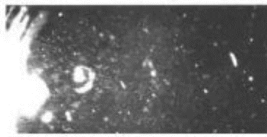


Plate 28 shows a relatively slow cosmic ray electron which traversed a considerable distance in the illuminated part of the (horizontal) chamber. The measured momentum of this particle is 7.3 MeV/c.

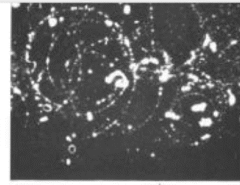


Plate 27 shows a single cosmic ray particle which was not significantly deflected in the magnetic field.

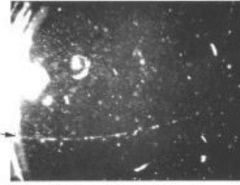


Plate 28 shows a relatively slow cosmic ray electron which traversed a considerable distance in the illuminated part of the (horizontal) chamber. The measured momentum of this particle is 7.3 MeV/c.

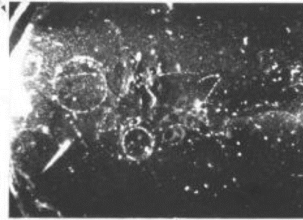


Plate 29 shows a pair of undeflected and almost parallel tracks dipping sharply relative to the plane of the chamber. These were no doubt members of a cascade.

Рисунок 1.3 — Копия работы Д. В. Скобелецина по исследованию треков частиц космического излучения в камере Вильсона. Стрелками показаны треки частиц высоких энергий.

было показано, что такие частицы часто появляются группами по несколько частиц. Результаты его наблюдений показаны на рисунке 1.3. В своих дальнейших работах он доказал, что измеряемая в ранних экспериментах ионизация может быть вызвана этими частицами высоких энергий. Это и стало первым упоминанием о космических лучах, как о частицах высоких энергий. В 1929 году Дмитрий Владимирович начинает свои исследования событий с несколькими релятивистскими частицами, образуемыми в камере Вильсона, которые были первыми и стали основой для физики высоких энергий. Например, используя этот подход, Карл Андерсон в 1932 году открывает позитрон, наблюдая за космическим излучением в камере Вильсона. Позже Андерсон с группой коллег открывает мюон в составе космических лучей.

1.1.2 Открытие широких атмосферных ливней

Следующим важным шагом стало открытие так называемых широких атмосферных ливней [25] (ШАЛ). Наблюдение групп частиц было еще замечено Д. В. Скобельциным, что положило начало экспериментам в этой области. Ключевым шагом для наблюдения ШАЛ было создание Вальтером Боте метода совпадений, с помощью которого, используя счетчики Гейгера–Мюллера, ему удалось зарегистрировать космическое излучение, за что ему была присуждена нобелевская премия по физике в 1954 году. Несмотря на работы других исследователей открытие ШАЛ принадлежит Пьеру Оже. В 1939 году он со своими коллегами проводил измерения в Швейцарских Альпах, в которых наблюдал срабатывание счетчиков Гейгера–Мюллера, подключенных к схеме совпадений. Оже было доказано существование каскадов частиц в атмосфере, охватывающих площади в тысячу и более квадратных метров; оцениваемая энергия первичных частиц, вызвавших эти каскады, была вплоть до 10^{15} эВ.

Открытие каскадов частиц в атмосфере совпало с разработкой электронно–фотонной каскадной теории, в частности Ганс Эйлер отождествил атмосферные ливни с электронно–фотонными лавинами, возникающими при взаимодействии электронов сверхвысоких энергий с веществом атмосферы. В течении ряда лет эта идея являлась общепринятой, пока Д. В. Скобельциным в 1942 году при анализе пространственных распределений частиц в составе ШАЛ не было обнаружено как распределение, согласующееся с электронно–фотонной каскадной теорией, так и новое, более широкое связанное с другими механизмами генерации частиц, приводящими к появлению частиц с высокой проникающей способностью. Последующие эксперименты под общим руководством Д. В. Скобельцина были направлены на объяснения свойств ливней, не укладывающихся в рамки электронно–фотонной лавинной теории.

По результатам экспериментов, выполненных в 1944–1948 годах на Памире (3860 м.н.у.м) и в Москве, установили, что эти ливни имеют фундаментальные отличия от электронно–фотонных каскадов. После этого в 1948 году Георгий Тимофеевич Зацепин высказал свою точку зрения о природе широких атмосферных ливней: 1) широкие атмосферные ливни порождаются нуклонами первичного космического излучения; 2) первый акт является ядерным взаимодействием, вторичные продукты которого образуют мягкую, проникающую и ядерно–активную компоненты широких атмосферных ливней; 3) вторичные ядерно–активные частицы, сталкиваясь с ядрами атомов воздуха, в свою очередь образуют все компоненты ливня, что приводит к возникновению ядерно–каскадного процесса. Такой взгляд на природу ШАЛ смог качественно объяснить не только их происхождение, развитие, но и накопленные на тот момент экспериментальные данные. Так же не подтвердились изначальные предположения о значительном числе электронов и фотонов сверхвысоких энергий в составе первичного космического излучения. В то же время в космических лучах были обнаружены электронно–ядерные каскады, а в 1947 году в составе космических лучей открыты π –мезоны, теоретически предсказанные еще в 1935 году.

Чередой этих открытий и достижений превратило физику космических лучей в один из разделов ядерной физики, а изучение широких атмосферных ливней стало методом исследования ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.

1.1.3 Разделение адронных и электромагнитных ШАЛ

При достижении частицами первичных космических лучей (ПКЛ) атмосферы Земли, они взаимодействуют с ее составляющими, в основном с ядрами

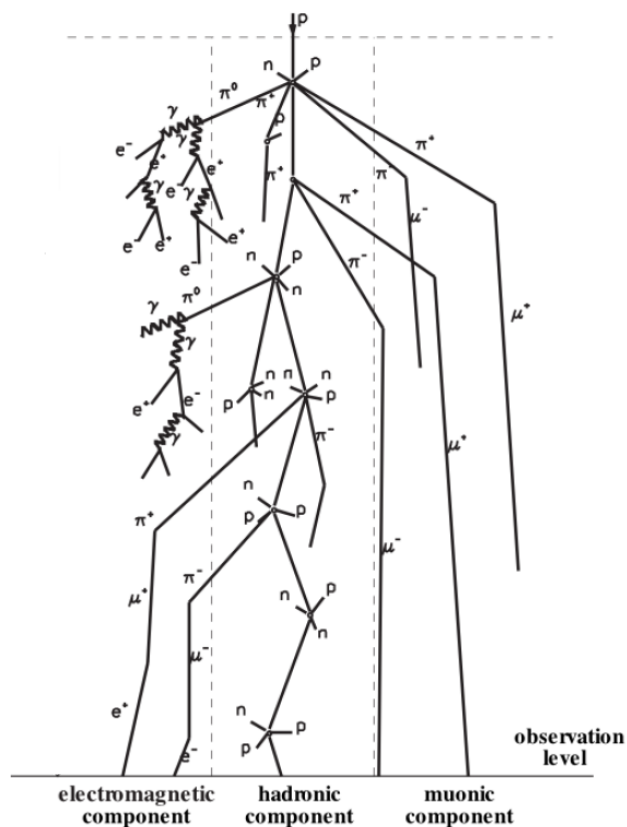
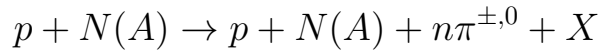


Рисунок 1.4 — Схема развития ШАЛ в атмосфере Земли.

азота и кислорода. Это приводит к многократному рождению вторичных частиц: мезонов, барионов, осколков ядер и других. Вторичные частицы высоких энергией продолжают свое движение через атмосферу, производя в основном пионы и каоны. Новые частицы в каскаде производятся до тех пор, пока средняя энергия на частицу превышает порог удельной энергии для их образования. После достижения максимума в развитии ливня число частиц в нем уменьшается, и составляющие каскада теряют свою энергию. Можно выделить три основных компоненты ШАЛ: адронную, электромагнитную и мюонную. Общая схема развития ШАЛ представлена на рисунке 1.4. Ниже кратко рассмотрены каждая из компонент в составе ШАЛ.

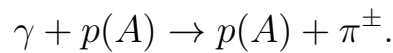
Адронная компонента ШАЛ

В случае когда первичная частица имеет адронное происхождение (протон, ядра атомов и др.), вторичные адроны образуются при первом взаимодействии. В основном это нуклон–нуклонные (N–N), нуклон–ядерные (N–A), ядро–ядерные (A–A), пион–нуклонные (π^\pm –N) и пион–ядерные (π^\pm –A) реакции, например:



где X обозначает другие частицы, включая дополнительные адроны. В основном это нейтральные и заряженные пионы, каоны, барионы (протоны, нейтроны и ядерные фрагменты), которые живут достаточно долго, чтобы подвергнуться дальнейшему взаимодействию, и являются источником нового поколения вторичных частиц.

Для ливней, инициированных частицами электромагнитного происхождения (фотон, электрон, позитрон и др.), рождение вторичных адронов возможно за счет фотоядерных реакций:



Однако этот тип взаимодействия имеет маленькое сечение, поэтому фотоядерные процессы играют незначительную роль в образовании адронной компоненты ШАЛ.

Вторичные адроны имеют относительно низкие средние поперечные импульсы, около 400 МэВ/с, поэтому высокоэнергетические адроны создают ядро ливня радиусом около 20 метров (называемое осью ливня), которое распространяется вдоль направления первичной частицы. Число адронов увеличивается с глубиной атмосферы, достигает своего максимума, а затем экспоненциально убывает.

Электромагнитная компонента ШАЛ

В случае, когда первичной частицей является адрон, основной вклад в электромагнитную составляющую ливня дает распад нейтральных мезонов:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Создаваемые в результате многократных адронных взаимодействий нейтральные пионы подпитывают электромагнитные каскады новыми фотонами, обладающими достаточной энергией для рождения электрон–позитронных пар. Рожденные лептоны теряют свою энергию в процессе тормозного излучения, создавая фотоны. Эти два процесса чередуются, приводя к развитию электромагнитных каскадов, делая этот компонент самым многочисленным в ливне. Эти каскады развиваются до тех пор, пока энергия фотонов имеют достаточно энергию для образования пар, и вероятность процесса тормозного излучения выше вероятности ионизационных потерь электронов.

В случае электромагнитной природы первичной частицы происходит развитие электромагнитного каскада, описанного выше, с меньшим образованием адронной и, как следствие, мюонной компоненты. В обоих случаях поперечное распределение для электромагнитных каскадов в атмосфере хорошо описывается функцией Нишимуры, Каматы и Грейзена [26, 27] (НКГ–функция):

$$\rho_e(r,s) = \frac{N_e}{r_1^2} \cdot \frac{\Gamma(4.5 - s)}{2\pi\Gamma(s)\Gamma(4.5 - s)} \cdot \left(\frac{r}{r_1}\right)^{s-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_1}\right)^{s-4.5},$$

где $\rho_e(r,s)$ – плотность электронов на расстоянии r от оси электромагнитного ливня возрастом s , N_e – общее число электронов на уровне наблюдений, r_1 – мольеровская единица.

Также стоит упомянуть дополнительные составляющие электромагнитной компоненты, такие как: флуоресцентный свет, изотропно излучаемый, в основном, атомами азота (в диапазоне длин волн 300–430 нм), возбуждаемый электронами в составе ШАЛ, а также излучение Вавилова–Черенкова, распространяющееся в узком конусе вокруг траектории движения ионизирующей частицы (чаще всего электрона или позитрона), движущейся со скоростью, превышающей скорость света в воздухе.

Мюонная компонента ШАЛ

Мюоны обильно рождаются в ливнях, в частности, наиболее интенсивно в адронных каскадах, и вносят около 10% в общий поток частиц в среднем атмосферном ливне на уровне Земли. Основной вклад в мюонную компоненту в атмосферных ливнях вносят распады заряженных пионов (π^\pm) и каонов (K^\pm):

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu),$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu),$$

$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu).$$

Также при наличии фотонов высоких энергий возможно рождение мюонных пар в кулоновском поле протона или ядра, по аналогии с рождением электрон–позитронной пары:

$$\gamma + p(A) \rightarrow p(A) + \mu^+ + \mu^-.$$

Важно заметить, что для ливней, образованных первичными фотонами, данный процесс вносит большой вклад в мюонную компоненту ливня из-за практически

полного отсутствия адронных взаимодействий. Поэтому в таких ливнях мюонная компонента значительно подавлена относительно тех ливней, в которых первичные частицы имеют адронное происхождение.

Мюоны высоких энергий ($E > 100$ ГэВ), возникающие на ранней стадии развития ШАЛ, распространяются преимущественно прямолинейно от места их рождения и до уровня наблюдения, при этом энергетические потери составляют около 1% и происходят в основном за счет ионизации. В процессе развития ливня в атмосфере адроны теряют свою энергию, вследствие чего уменьшается энергия вторичных частиц и, как следствие, энергия мюонов тоже будет уменьшаться. В результате чего мюоны низких энергий, созданные на поздней стадии развития каскада, имеют шанс распасться до достижения уровня наблюдения:

$$\mu^{\pm} \rightarrow +e^{\pm} + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}) + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}).$$

Фотон–адронное разделение ШАЛ

Хотя космические γ -кванты относительно низких энергий (около 1 ГэВ) были обнаружены в результате прямых наблюдений со спутников или аэростатов, то для больших энергий прямая регистрация недоступна из-за крутизны энергетического спектра первичных фотонов. Следовательно, единственным способом обнаружить фотоны с энергиями более 1 ТэВ является регистрация ШАЛ, образованных такими фотонами. Поэтому одной из основных задач современной гамма-астрономии сверхвысоких энергий является определение типа первичной частицы, а конкретно – выделения ливней, образованных первичными фотонами от всех остальных, преимущественно ливней образованных первичными адронами (протоны, ядра атомов и др.). На рисунке 1.5 показан

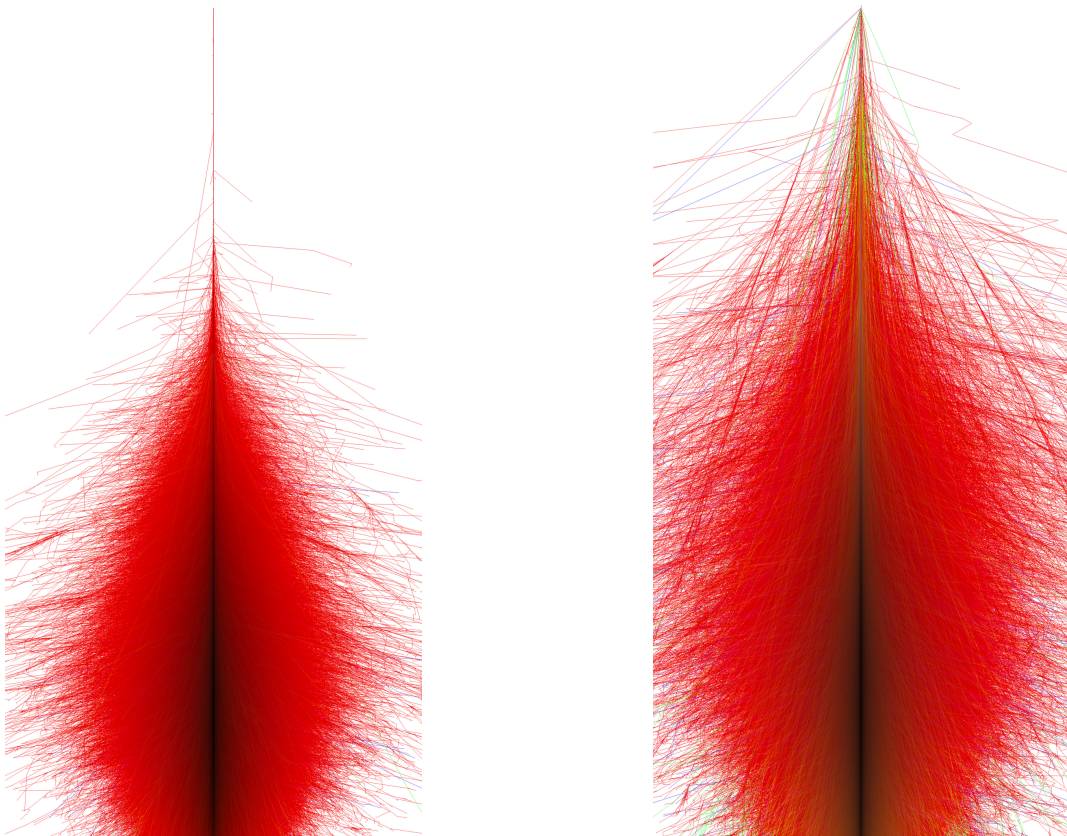


Рисунок 1.5 — Продольный профиль ШАЛ с энергией 1 ПэВ образованного первичным фотоном (слева) и первичным протоном (справа). Источник: www.iap.kit.edu.

продольный профиль для ливня образованного первичным фотоном (слева) и первичным протоном (справа) с одинаковой энергией 1 ПэВ.

Впервые идея регистрации проникающей мюонной компоненты ШАЛ для последующего разделения ливней по типу первичной частицы была высказана в работе [28]. Суть метода заключалась в создании детекторов, имеющих некоторый слой вещества, используемого в качестве поглотителя электромагнитной компоненты, вследствие чего эти детекторы будут чувствительны к мюонной компоненте ШАЛ. Регистрируя плотность мюонов на различных расстояниях от оси ливня и применяя функции пространственного распределения (ФПР) можно оценить общее число мюонов N_μ . Таким образом, в дополнение к наземным установкам, регистрирующим плотность частиц электромагнитной компоненты ШАЛ и восстанавливающим с помощью НКГ функции размер ливня N_e , добавляется число мюонов N_μ в ливне. Анализируя отношение этих двух компонент, можно выделить так называемые обедненные мюонами ливни, которые будут являться кандидатами в фотонные ШАЛ.

Впоследствии работа [28] получила не только развитие [29], но и подтверждение со стороны других экспериментов [30, 31, 32]. В настоящее время метод мюон–обедненных ливней используется в подавляющем большинстве установок, нацеленных на регистрацию фотонов с энергиями более 100 ТэВ.

1.2 Обзор ранних экспериментов и их результатов по поиску гамма–излучения сверхвысоких энергий

1.2.1 Установки для регистрации гамма–излучения сверхвысоких энергий

Установка Кильского университета

Экспериментальная установка Кильского университета [1] располагалась на уровне моря на широте 54.4° и была построена в 1976 году с целью изучения электромагнитной, адронной и мюонной структуры ШАЛ в диапазоне первичных энергий от 10^{15} до 10^{17} эВ.

В эксперименте было задействовано 28 сцинтилляционных счетчиков площадью 1 м^2 , расположенных на расстояниях до 100 метров относительно центра установки. Эти детекторы использовались для определения местоположения оси ливня, размера ливня N_e и параметра возраста s . Направление прихода каждого ливня определялось путем измерения временных задержек при прохождении фронта ливня через 11 счетчиков, оснащенных быстродействующими фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), точность измерения времени составляла около 1 нс, что соответствовало оценкам углового разрешения около 1° . Абсолютное время прихода каждого ливня измерялось с точностью до 1 минуты.

Установка «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории

Установка «Ковер» [33, 34, 35, 36] создавалась как многоцелевой детектор космических лучей, но регистрация широких атмосферных ливней с самого начала была одной из главных ее целей. После результатов Кильского университета и появлении общего интереса к гамма-астрономии сверхвысоких энергий, на установке «Ковер» также была реализована программа по поиску ШАЛ, образованных первичными фотонами.

Установка располагается на высоте около 1700 метров над уровнем моря, данная высота соответствует глубине атмосферы 840 г/см^2 . Центральная часть установки расположена в здании с толщиной крыши 29 г/см^2 и состоит из 400 жидкостных сцинтилляционных счетчиков, описанных в главе 2.1.1, которые расположены в виде квадрата со сторонами 14 метров и эффективной площадью 196 м^2 . Шесть выносных пунктов регистрации расположены на расстоянии 30 и 45 метров от центрального детектора и состоят из 18 аналогичных сцинтилляционных счетчиков и эффективной площадью около 9 м^2 . Схема установки «Ковер» представлена на рисунке 1.6.

Центральный детектор был разделен на четыре группы (А–Г), сигналы с каждой группы поступали на схему четырехкратных совпадений, которая давала старт измерениям временных задержек с выносных пунктов регистрации. При пятикратном совпадении сигнала от центрального детектора и от четырех пунктов регистрации (№1–№4, рис. 1.6) генерировался сигнал, запускающий систему сбора данных. Первоначально угловое разрешение установки оценивалось, исходя из распределения измеренных временных задержек и равнялось примерно 1.1° , однако, последующие измерения, выполненные совместно с черенковским телескопом [37], показали, что угловое разрешение установки составляет 4.7° для 86% С.Л. и 3.1° для 72%.

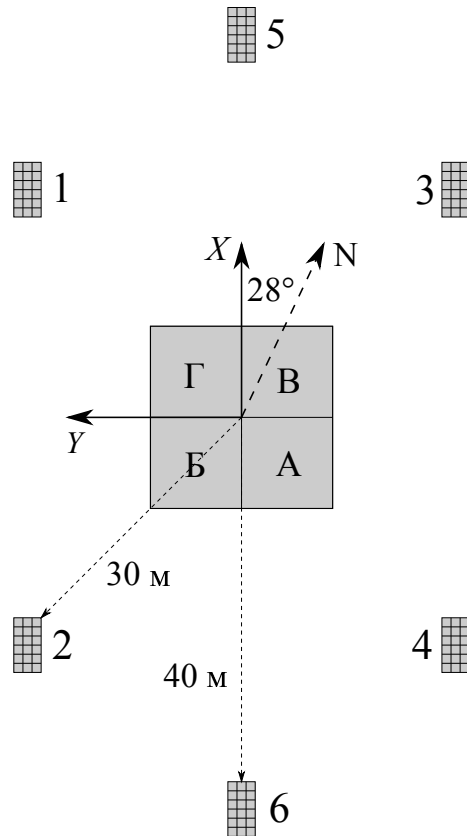


Рисунок 1.6 — Схема установки «Ковер».

Установка Kolar Gold Fields

Установка Kolar Gold Fields [38] располагалась на территории золотодобывающих приисков в индийском районе Колар, глубина атмосферы $920 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$. Основной целью эксперимента было точное измерение параметров ливней с размерами около 10^4 частиц и регистрации ливней размерами до 10^7 частиц.

Наземная часть установка состояла из 127 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, площадью 1 м^2 каждый. Все счетчики использовались для измерения плотности частиц в ливне и восстановления размера N_e ливня. Из них 61 счетчик был подключен к системе измерения времени с наносекундным разрешением для определения направления прихода ливня. Мюонный детектор включал 7 модулей, имеющих площадь 28.2 м^2 каждый, которые регистрировали факт пролета частицы через него. Над счетчиками находилось

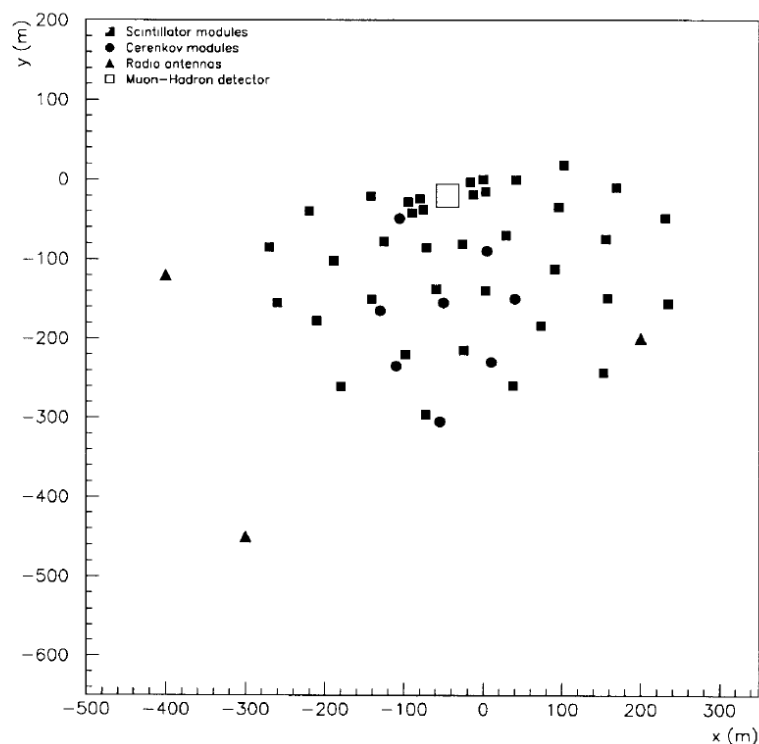


Рисунок 1.7 — Схема установки EAS-TOP.

2.55 метров гранитного поглотителя, соответствующего энергетическому порогу для вертикальных мюонов около 1 ГэВ. Угловое разрешение установки оценивалось исходя из экспериментальных данных и равнялось 2.3° для ливней с размерами более 2×10^4 частиц.

Установка EAS-TOP

Установка EAS-TOP [39, 40] расположена в центральной Италии над подземной лабораторией Гран-Сассо на высоте 2005 метров над уровнем моря, соответствующей глубине атмосферы 810 г/см^2 . И предназначалась для исследований в области гамма-излучения сверхвысоких энергий, а также изучения спектра и состава ПКЛ.

В состав установки входило 37 наземных модулей сцинтилляционных детекторов, в максимальной конфигурации установки, для регистрации электро-

магнитной компоненты ШАЛ. Каждый модуль имел площадь 10 м^2 и состоял из 16 отдельных сцинтилляционных счетчиков, площадью $80 \times 80 \text{ см}^2$ и толщиной 4 см. ФЭУ располагался на расстоянии 30 сантиметров над сцинтиллятором. Сигналы с каждого модуля по кабельной задержке 350 метров поступали в аппаратный зал для измерения энерговыделения и временных задержек. Для регистрации излучения Вавилова–Черенкова, образующегося в атмосфере, было установлено восемь телескопов, каждый из которых состоял из четырех параболических зеркал площадью 0.6 м^2 .

Также установка была оборудована калориметром для регистрации мюонов и адронов высоких энергий, имеющего размеры $12 \times 12 \text{ м}^2$ и покрытого свинцовым листом толщиной 15 см. Калориметр состоял из 9 слоев железного поглотителя, каждый слой имел толщину 15 сантиметров, между слоями поглотителя находилось три плоскости стримерных трубок, каждая размером $3 \times 3 \times 1200 \text{ см}^3$. Общая толщина калориметра соответствовала 818 г/см^2 , а угловое разрешение при регистрации мюонов высоких энергий составляло 0.9° .

Установка на шахте Охья

Японская установка, расположенная на территории шахты Охья [41] ($36^\circ.57 \text{ N } 139^\circ.84 \text{ E}$), на высоте примерно 150 метров над уровнем моря. Основными целями было изучение состава ПКЛ и наблюдение гамма квантов в области энергий до 10^{16} эВ, для чего она было оборудована мюонным детектором большой площади.

Наземная часть установки эффективной площадью около 10000 м^2 состояла из 42 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора площадью 0.25 м^2 каждый и оснащенных 2 дюймовыми ФЭУ. Анодные сигналы ФЭУ с каждого счетчики подавались на время-цифровой преобразователь (ВЦП), для измере-

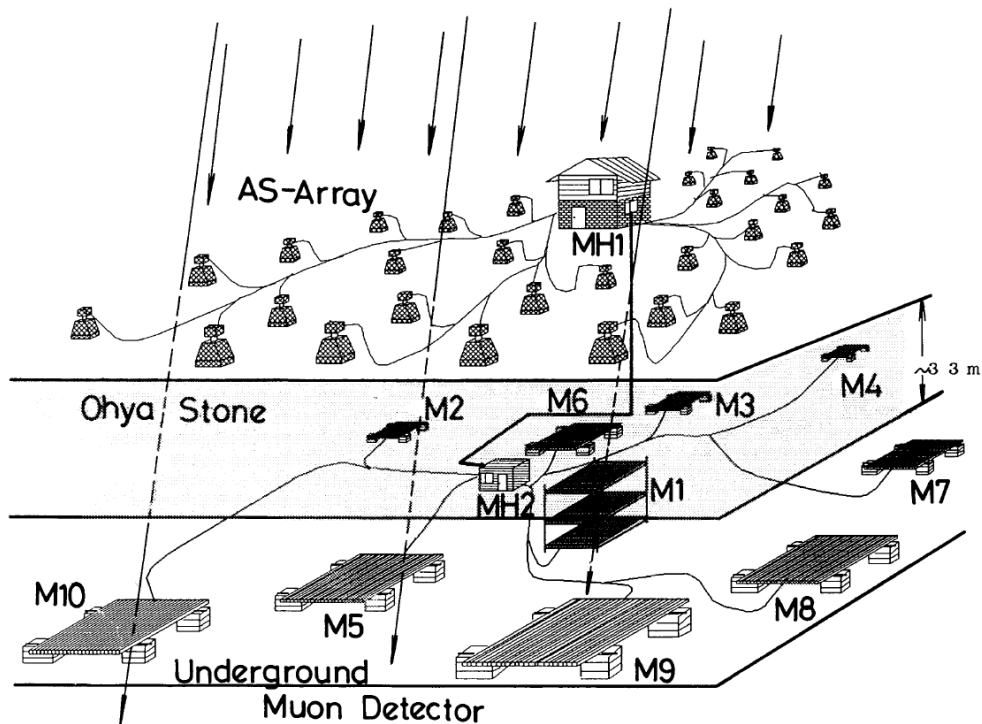


Рисунок 1.8 — Схема установки расположенной на шахте Охья.

ния временных задержек и последующего восстановления направления прихода ливня. И на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для измерения амплитуды сигнала в относительных единицах “частицах”, которая соответствует наиболее вероятной амплитуде анодного сигнала ФЭУ при прохождении одиночной вертикальной заряженной частицы и равнялась примерно 3 мВ. В дальнейшем полученное число “частиц” использовалась для восстановлению числа электронов N_e в ливне, согласно НКГ функции. Угловое разрешение установки определялось исходя из экспериментальных данных и равнялось примерно 1.2° .

Важной особенностью установки являлось наличие подземного мюонного детектора общей площадью 400 м^2 , находящегося на глубине 33 метра, соответствующей энергии вертикальных мюонов более 14 ГэВ. Он состоит из центрального детектора M1 (рис. 1.8), имеющего три горизонтальные плоскости пропорциональных счетчиков, расположенные на расстоянии 2.5 метров друг над другом, площадь каждой плоскости около 38.4 м^2 . Такое расположение счетчиков позволяет независимо определять направление прихода ливня не хуже

чем 1.7° . Детекторы M2–M10 состоят из одного слоя пропорциональных счетчиков. Каждый пропорциональный счетчик детекторов M1–M10 имел размеры $10\text{ см} \times 10\text{ см} \times 8\text{ см}$. Пропорциональные счетчики мюонного детектора регистрировали только сам факт прохождения мюона через счетчик, в результате чего по числу сработавших счетчиков и их пространственному распределению восстанавливалось число N_μ мюонов в ливне.

Установка CYGNUS

Установка CYGNUS располагалась в Лос-Аламосе, США (35.9° N , 106.3° W), на высоте 2310 метров над уровнем моря, соответствующей глубине атмосферы 800 гр/см^2 . Установка была развернута вокруг поглотителя пучка ускорителя Los-Alamos Meson Physics Facility (LAMPF). Можно выделить два основных этапа в развитии эксперимента CYGNUS-I и CYGNUS-II.

На первом этапе установка состояла из 108 наземных сцинтилляционных счетчиков, расположенных на площади $2.2 \times 10^4\text{ м}^2$. В качестве рабочего вещества использовался пластический сцинтиллятор цилиндрической формы площадью $0,825\text{ м}^2$ ($D=1.02\text{ м}$) и толщиной 10 сантиметров. Расстояние между счетчиками составляло семь метров вблизи центра установки и увеличивалось до 20 метров для крайних счетчиков, рисунок 1.9. Для регистрации мюонной компоненты в составе ШАЛ использовались два детектора E-225 и E-645, рисунок 1.9, созданные для изучения взаимодействий нейтрино, образовавшихся в веществе поглотителя пучка LAMPF.

На второй стадии эксперимента было добавлено 96 новых пластических сцинтилляционных счетчиков, площадью $1 \times 1\text{ м}^2$, за счет демонтажа детектора E-225. В результате чего общая площадь установки увеличилась до $6.2 \times 10^4\text{ м}^2$. Также был создан новый мюонный детектор общей эффективной площадью

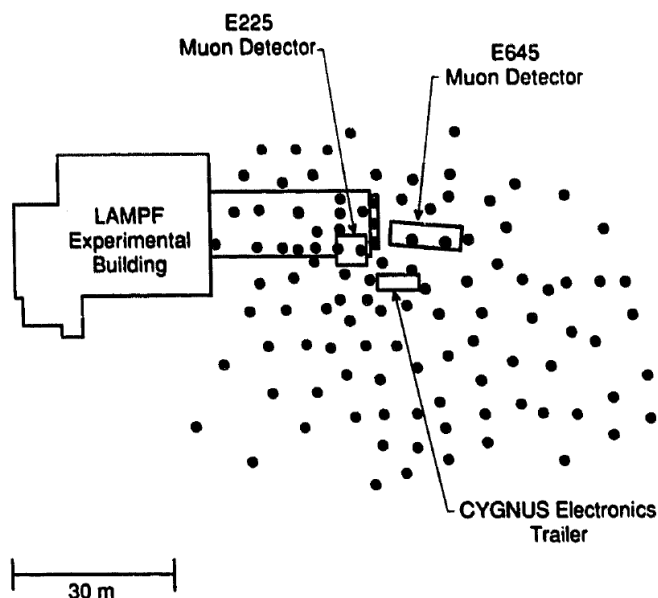


Рисунок 1.9 — Схема расположения наземных счетчиков установки CYGNUS-I, а также мюонных детекторов.

70 м² и слоем грунта над детектором 710 гр/см². Подробное техническое описание установки на каждом этапе ее развития, а также алгоритмы восстановления параметров ШАЛ можно найти в работе [42].

Установка CASA-MIA

Установка CASA-MIA (Chicago Air Shower Array and Michigan Muon Array) [43] расположена на испытательном полигоне Дагуэй к юго-западу от Солт-Лейк-Сити, глубина атмосферы составляет около 870 гр/см².

Наземная часть установки (CASA) состояла из 1089 детекторов, каждый из которых содержал четыре счетчика на основе пластического сцинтиллятора, имевшего форму квадрата со сторонами 61×61 см², и толщиной 1.27 см, светосбор осуществлялся с помощью ФЭУ с диаметром фотокатода 5 сантиметров. Детекторы располагались на расстоянии 15 метров друг от друга в квадратной сетке.

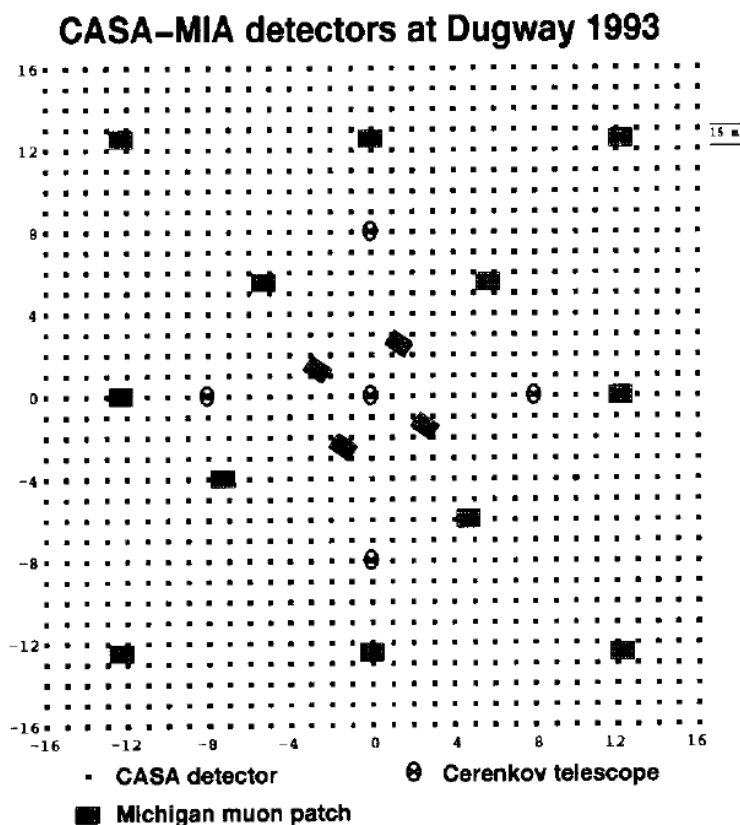


Рисунок 1.10 — Схема установки CASA–MIA.

Регистрация мюонной компоненты осуществлялась с помощью подземного мюонного детектора (MIA), состоящего из 16 модулей по 64 пластических сцинтилляционных счетчика с размерами $1.9 \times 1.3 \text{ м}^2$ и толщиной 64 сантиметра каждый. Таким образом общая площадь мюонного детектора составляла более 2500 м^2 . Каждый модуль закапывали в землю на три метра, данная глубина соответствовала пороговой энергии для вертикальных мюонов около 750 МэВ. Расположение модулей мюонного детектора, а также наземных детекторов показано на рисунке 1.10.

1.2.2 Наблюдение излучения от Лебедь X–3

Лебедь X–3 является двойной системой, характеризующийся переменным излучением в рентгеновском, инфракрасном и радио–диапазонах. В оптическом диапазоне он незаметен из–за поглощения в галактической плоскости.

Установка Кильского университета

Одними из первых в мире о регистрации гамма–излучения сверхвысоких энергий от точечного источника сообщила группа ученых из Кильского университета [1].

Метод анализа основывался на том, что основной вклад в зарегистрированные ливни вносится заряженными частицами, которые отклоняются в магнитных полях от своих исходных траекторий и изотропно распределены по небу, и являются фоном. Однако первичные фотоны способны сохранять направление своего движения, что позволяет выделять их источник на фоне остальных событий. Таким образом, сравнивая темп счета ШАЛ из области пространства с центром в источнике и темпом счета из смежных с источником областей, можно обнаружить превышения над фоном, которое будет соответствовать фотонным ливням.

Также производился дополнительный отбор ливней по их возрасту. Параметр возраста s НКГ функции описывает состояние продольного развития электромагнитного каскадного ливня. Ливень идентифицировался как фоновое событие, если измеренное значение параметра возраста сильно отличалось от ожидаемого для него по теории электромагнитных каскадов.

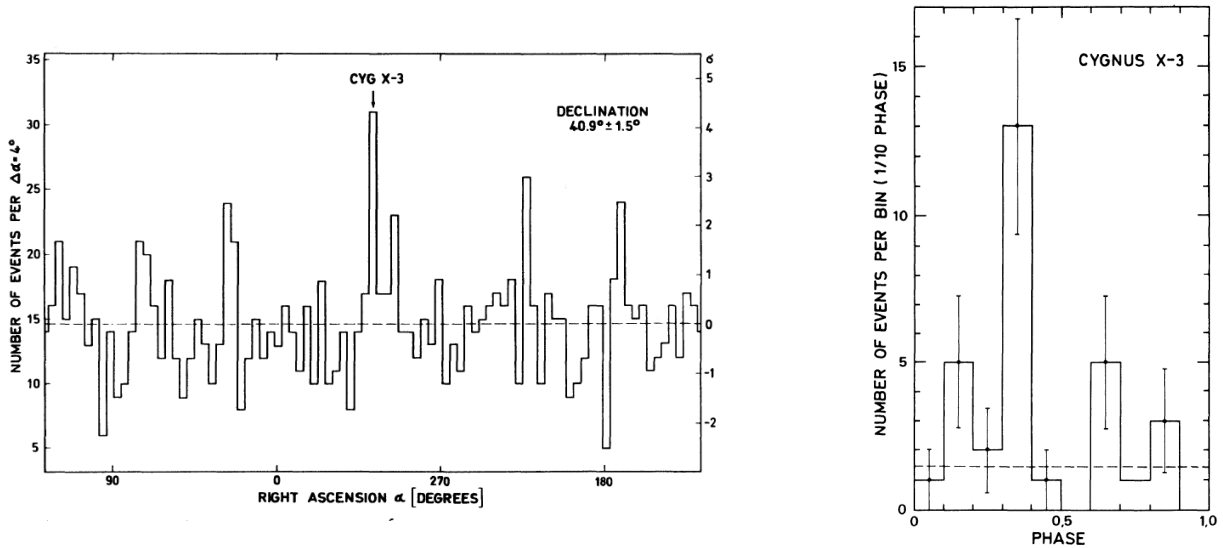


Рисунок 1.11 — Слева: распределение числа зарегистрированных ШАЛ с $N_e \geq 10^5$ и $s \geq 1.1$ для склонения $\delta = 40.9^\circ \pm 1.5^\circ$, как функция прямого восхождения. Справа: фазовое распределение событий для ливней с $N_e \geq 10^5$ и $s \geq 1.1$ пришедших с направления: $\delta = 40.9^\circ \pm 1.5^\circ$ и $\alpha = 307.8^\circ \pm 2^\circ$.

Наблюдения проводились с марта 1976 года по январь 1980 года и эффективное время работы установки составило 16775 часов, а общее время наблюдения источника Лебедь X-3 составило 3838 часов. В анализе участвовали ливни с осью, расположенной на расстоянии не более 30 метров от центра установки из-за возрастающей ошибки в определении полного числа частиц N_e . Допустимый диапазон зенитных углов θ был в пределах 30° .

Для отобранных ливней с параметром возраста ливня $s \geq 1.1$ наблюдалось превышение числа зарегистрированных событий над фоном, соответствующее статистической значимости 4.4σ , рисунок 1.11 слева, вероятность случайного совпадения составляет 10^{-4} . Также на рисунке 1.11 справа изображено фазовое распределение событий, для которого также наблюдается превышение событий над фоном на фазе 0.4.

Установка «Ковер»

В октябре 1985 года был зарегистрирован яркий радиовсплеск от Лебедь X-3, 9 октября максимальная плотность потока составила 18 Ян для длин волн 11.1 см. При обработке данных было обнаружено превышение числа зарегистрированных ШАЛ над фоном от источника в период 14–16 октября [2]. Стоит заметить, что энергия первичной частицы не восстанавливалась, а энергетический спектр зарегистрированных ливней зависел от предполагаемого спектра гамма-излучения источника.

Для анализа данных использовался стандартный (ON/OFF) метод, в котором сравнивается темп счета ШАЛ в круговой ячейке радиусом 2.5° и центром в источнике (сигнал, ON) с фоновым темпом счета (шум, OFF) в четырех ячейках аналогичной формы и размера, две из которых смещены на $\pm 5^\circ$ по склонению, а другие две на $\pm 6.5^\circ$ по прямому восхождению соответственно. При данном расположении и размерах все внешние ячейки имеют одинаковый телесный угол, что и центральная ячейка.

В период с 1 июля 1984 по 30 июня 1985 превышения числа ШАЛ над фоном зарегистрировано не было. Наилучшее соотношение сигнал/шум было получено в период 14–16 октября, рисунок 1.12. Несовпадение максимума радиоизлучения 9 октября и избытка ШАЛ 14 октября изначально не могли быть объяснены из-за отсутствия механизмов генерации гамма-излучения сверхвысоких энергий в Лебедь X-3. Вскоре В.С. Березинский предложил [45] довольно простую модель, в которой гамма-излучение сверхвысокой энергии поглощается радиоизлучением внутри источника. Таким образом, гамма кванты могут покинуть источник только при уменьшении потока радиоизлучения.

Несмотря на то, что данные установки «Ковер» совпали по времени с вспышкой в радиодиапазоне, низкая статистическая значимость и отсутствие подтверждения от других экспериментов не позволяют говорить об убедитель-

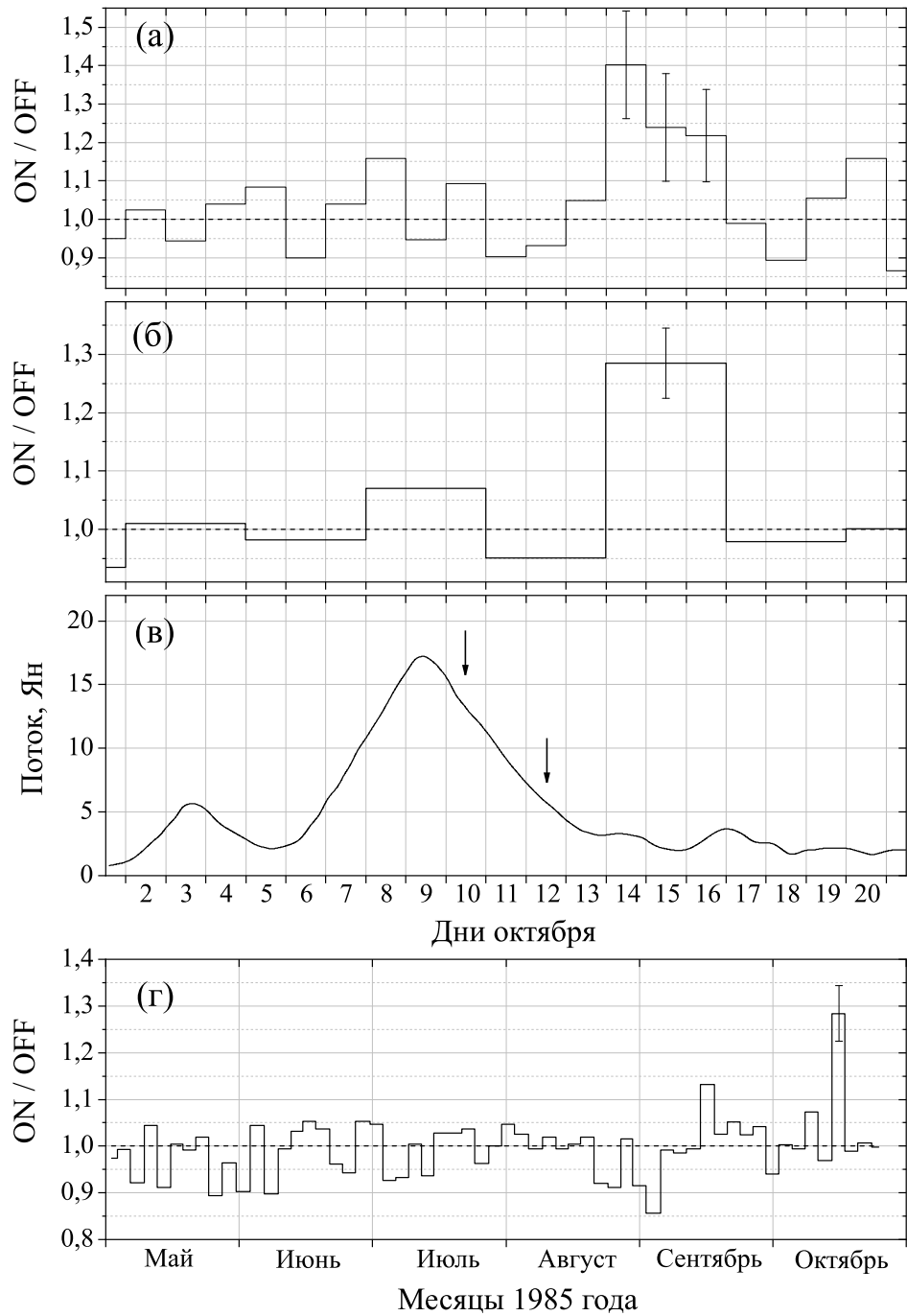


Рисунок 1.12 — Отношение сигнал/шум для: (а) октября с шагом один день; (б) октября с шагом три дня; (г) периода май–октябрь 1985 года с шагом три дня. (в) профиль радиовспышки в октябре, две стрелки соответствуют гамма–вспышкам, зарегистрированным телескопом Gulmarg [44], с порогом около 6 ТэВ.

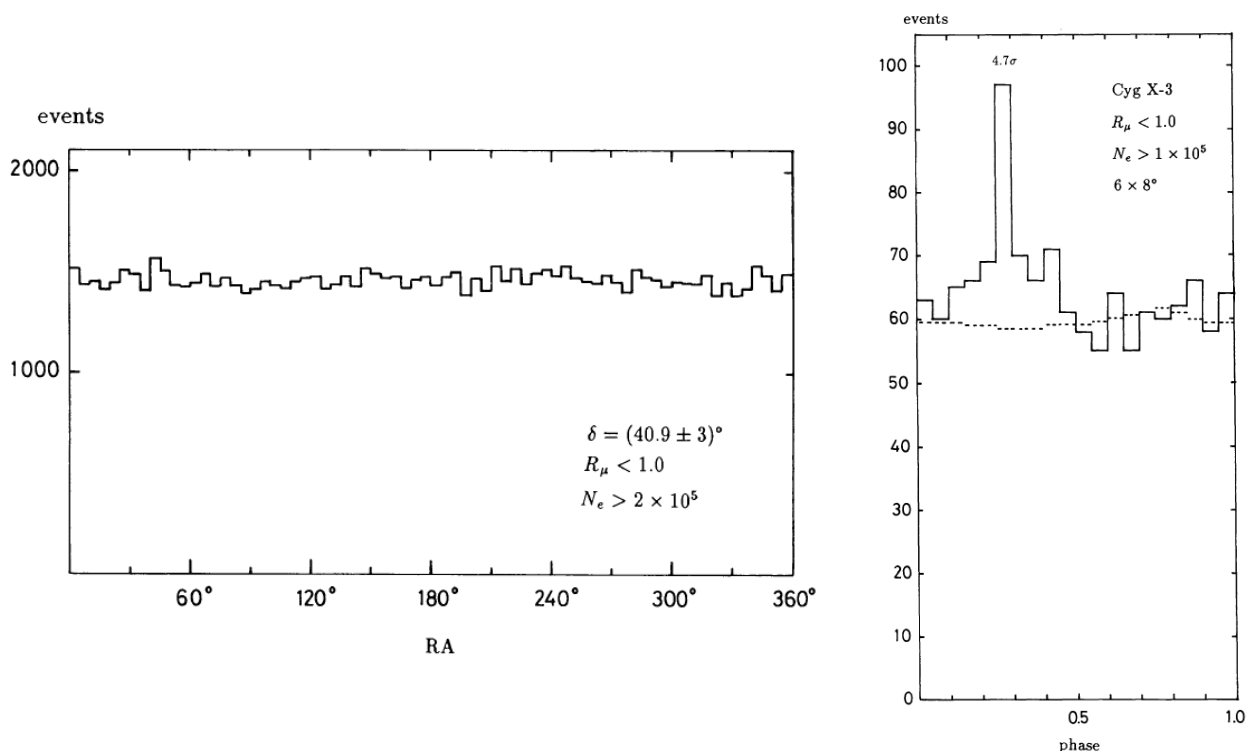


Рисунок 1.13 — Слева: распределение событий по прямому восхождению для области склонений $40.9 \pm 3^\circ$. Справа: Фазовое распределение событий из области Лебедь X–3 в окне $\pm 3^\circ \delta$ и $\pm 4^\circ$ R.A. с центром в источнике, пунктирной линией показан ожидаемый фон.

ном доказательстве регистрации вспышки в Лебедь X–3. Однако результаты японского эксперимента, который будет рассмотрен ниже, косвенно подтверждает эти результаты.

Установка на шахте Охья

В 1989 году установка расположенная на территории шахты Охья, сообщила о регистрации [3] вспышки в источнике Лебедь X–3, которая также совпала с вспышкой в радио диапазоне.

Критерии отбора событий были следующими: (1) зенитный угол $\theta \leq 25$, (2) число сработавших каналов ВЦП ≥ 8 , (3) как минимум четыре канала АЦП должны зарегистрировать амплитуду более чем 1.25 частиц, (4) восстановлен-

Установка	Время набл. (UT)	ON	OFF	σ
KGF	13–16	35	17.8	3.4
Ковер	15–18	55	31.4	3.1
EAS–TOP	17–20	38	25.5	2.1

Таблица 1.1: Результаты наблюдения вспышки в Крабовидной Туманности по данным установок: KGF, Ковер и EAS–TOP.

ный размер ливня $N_e \geq 2 \times 10^4$, (5) относительная доля мюонов в ливне $R_\mu \leq 1$, где $R_\mu = N_\mu / \langle N_\mu \rangle$, а в свою очередь $\langle N_\mu \rangle = 0.14 \langle N_e \rangle^{0.78}$. Впоследствии события разделяются по склонению с целью дальнейшего поиска сигнала от точечных источников, например: $40.9 \pm 6^\circ$ для Лебедь X–3 и $35.4 \pm 6^\circ$ для Геркулес X–1.

Как показано на рисунке 1.13 слева, при распределении событий по прямому восхождению в области склонений $40.9 \pm 3^\circ$ какого либо превышения в событиях из области источника не было обнаружено. Однако, как показано на том же рисунке слева, при фазовом распределении событий наблюдается отчетливый пик на фазе 0.3 со статистической значимостью 4.7σ .

1.2.3 Наблюдение вспышки в Крабовидной Туманности

Наблюдение возможной вспышки в созвездии Лебеда послужило дополнительным стимулом для развития экспериментов по регистрации гамма–излучения сверхвысоких энергий. Такой подход принес свои результаты уже 23 февраля 1989 года, когда тремя установками, таблица 1.1, была зарегистрирована вспышка в Крабовидной Туманности.

Крабовидная Туманность (M1, NGC 1952) является туманностью в созвездии Тельца, возникла в результате взрыва сверхновой SN 1054, наблюдения которой были задокументированы в Китае в 1054 году. В центре туманности

находится пульсар PSR B0531+21, являющийся нейтронной звездой, который был открыт в 1968 году.

Регистрация излучения установкой «Ковер»

Установка «Ковер», которая уже была описана в 1.2.1, 23 февраля 1989 года зарегистрировала [4] значительный избыток событий относительно фона из области с центром в Крабовидной Туманности. Анализ данных проводился по тому же алгоритму, что и для Лебедь X-3. Всего из ячейки с центром в источнике было зарегистрировано 55 событий при значении 8 фоновых ячеек 34.1 событий, что соответствует соотношению сигнал/шум 1.6 и статистической значимости 3.1σ . Распределение 55 событий по времени их прихода показано на рисунке 1.14 слева. Также было построено относительное фазовое распределение 55 событий, показанное на рисунке 1.14 справа. Фаза показана относительно произвольной точки в цикле импульса пульсара, это объясняется тем, что часы установки не имели точной привязки к абсолютному времени.

Установка Kolar Gold Fields

Одним из основных результатов установки KGF была регистрация вспышки в Крабовидной Туманности [5], причем максимум событий был зарегистрирован на несколько часов раньше установки «Ковер».

При анализе данных применялся ON/OFF метод, который ранее был описан. На рисунке 1.15 (слева) показано распределение числа зарегистрированных событий в зависимости от времени, для сравнения на график были нанесены данные установки «Ковер». Всего от источника были зарегистрированы 35 со-

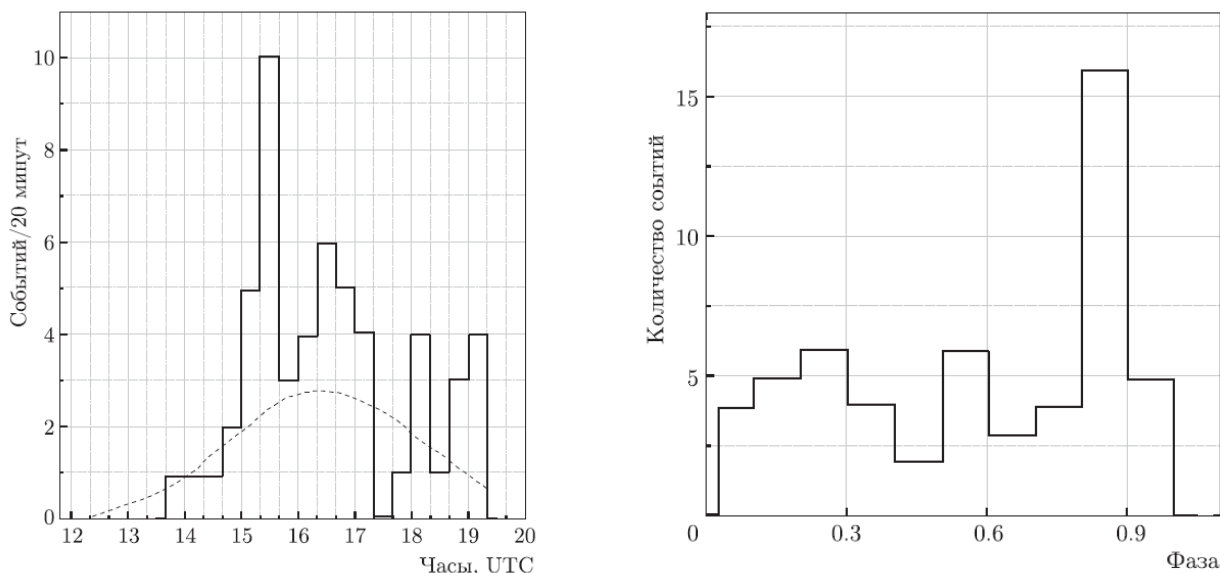


Рисунок 1.14 — Слева: распределение событий в 20-минутном интервале, пришедших от Крабовидной Туманности 23 февраля 1989 года. Пунктирная линия соответствует ожидаемому фону. Справа: относительное фазовое распределение 55 событий.

бытий при ожидаемом фоне 17.8, что соответствует статистической значимости 3.4σ . Также для зарегистрированных от источника ливней было построено фазовое распределение, которое показано на рисунке 1.15 (справа).

Установка EAS-TOP

Вспышка в Крабовидной Туманности также была зарегистрирована Итальянской установкой EAS-TOP [6]. Регистрируемые события делились на две группы: 1) события, в которых ось ливня находилась в пределах внутренней части установки – для таких событий определялся размер ливня N_e и его возраст s ; 2) события меньших энергий или события, в которых ось ливня находится за пределами установки. Для поиска событий от источника использовался стандартный ON/OFF метод. Число событий из ячейки ON с центром в источнике сравнивалось со средним значением событий из шести ячеек OFF, которые на-

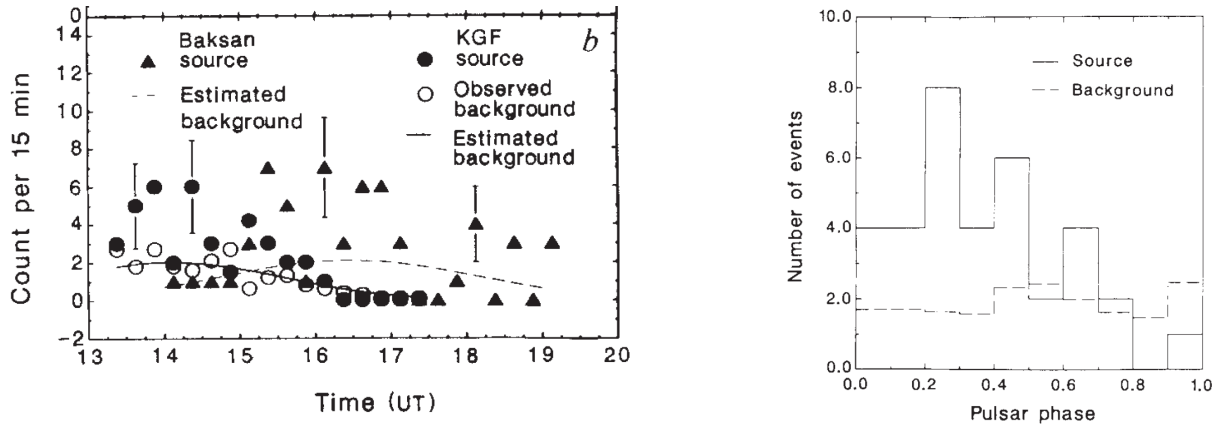


Рисунок 1.15 — Слева: распределение событий в 15-минутном интервале, пришедших от Крабовидной туманности 23 февраля 1989, года установок KGF и «Ковер». Справа: фазовое распределение зарегистрированных ШАЛ от Крабовидной Туманности.

ходились на том же склонении, но были сдвинуты по прямому восхождению относительно источника.

Для двух групп отобранных событий были получены следующие значения: 1) $ON=38$ событий, $\langle OFF \rangle=25.5$ событий; 2) $ON=403$ событий, $\langle OFF \rangle=378.3$ событий. Что соответствовало статистической значимости $\sigma_1=2.3$ и $\sigma_2=1.2$ стандартных отклонений соответственно. Также для событий первой группы было построено распределение в зависимости от времени прихода, которое показано на рисунке 1.16. Низкая статистическая значимость не позволяет говорить о достоверном наблюдении, однако, тот факт, что излучение от Крабовидной Туманности было независимо зарегистрировано тремя установками. Причем максимум событий приходился примерно на кульминацию источника для каждой установки позволяет говорить о достоверной наблюдении гамма-излучения сверхвысоких энергий.

Кроме того, по данным установки EAS-TOP были получены верхние пределы на поток диффузного гамма-излучения сверхвысоких энергий. Методика расчета и обсуждение результатов приведена в работе [46], а сравнение с результатами других установок показано на рисунке 1.17.

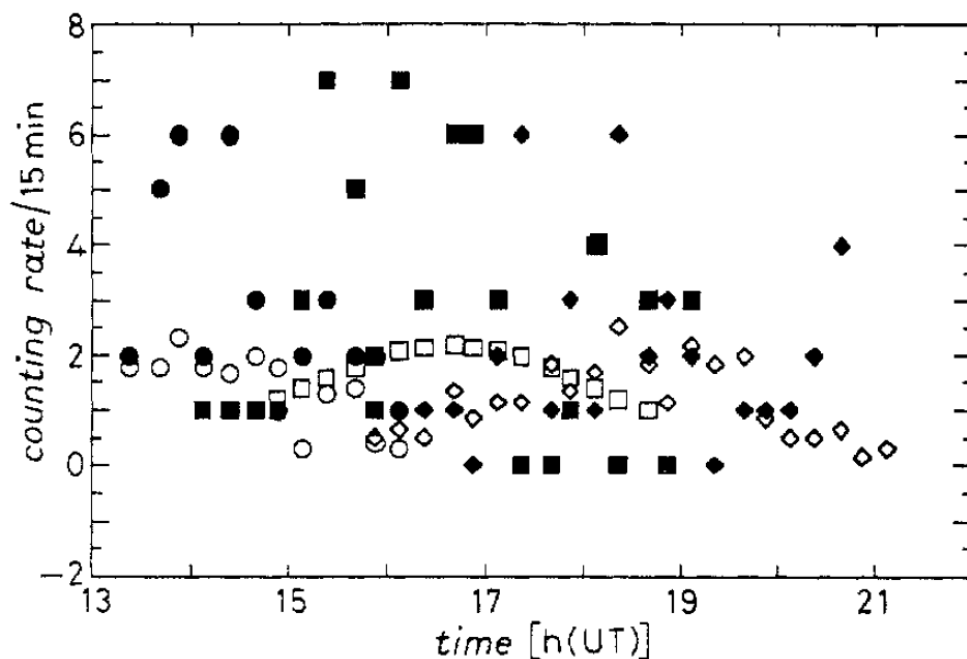


Рисунок 1.16 — Сравнение числа событий в 15 минутном интервале, зарегистрированных установками EAS-TOP (ромбы), KGF (круги) и «Ковер» (квадраты). Заполненные фигуры соответствуют экспериментальным данным, а пустые – ожидаемому фону.

1.2.4 Ограничения на потоки гамма-излучения сверхвысоких энергий

Установка CYGNUS

За время работы установки с апреля 1986 по май 1991 года был получен набор данных для склонений от 0° до 80° . В эту область попадали несколько источников, от которых ранее было зарегистрировано гамма-излучение сверхвысоких энергий, такие как Лебедь X-3 и Крабовидная Туманность. После анализа данных превышения над фоном не было обнаружено, поэтому были поставлены верхние ограничения на поток фотонов с энергией более 40 ТэВ на уровне достоверности 90%, которые приведены в таблице 1.2.

Источник	Ограничения на поток ($E > 40$ ТэВ)
Крабовидная Туманность	$< 4.4 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Лебедь X-3	$< 1.9 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Геркулес X-1	$< 1.6 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Таблица 1.2: Ограничения на поток для точечных источников по данным установки CYGNUS [47]

Установка CASA–MIA

По данным установки CASA–MIA также был произведен поиск излучения для трех астрофизических объектов, которые являются возможными источниками гамма-излучения сверхвысоких энергий. Поиск избытка событий от источника проводился для двух выборок данных: первая включала в себя все события, прошедшие первичный отбор, и вторая состояла из ливней, обедненных мюонами. Параметры восстановления событий, критерии отбора мало-мюонных событий, а также результаты первых двух лет работ установки приведены в работе [50]. По результатам работы установки за период с 31 января 1990 г. по 30 января 1991 г. был проведен поиск гамма-излучения сверхвысоких энергий [51] от трех точечных источников: Лебедь X-3, Геркулес X-1 и Крабовидной Туманности. Превышения событий над фоном также не было обнаружено ни для одной из выборок, полученные ограничения на поток представлены в таблице 1.3.

Также по данным установки были сделаны ограничения на потоки диффузного гамма-излучения сверхвысоких энергий, которое рассмотрено в главе 1.3.1 и 1.3.3. Методика расчета, результаты, а также их обсуждение приведены в работе [52]. На рисунке 1.17 показаны результаты в сравнении с другими установками.

Источник	E_{median} ТэВ	Все события	Маломюонные события
Крабовидная Туманность	240	$< 7.4 \times 10^{-14}$	$< 2.2 \times 10^{-14}$
Лебедь X-3	190	$< 1.9 \times 10^{-13}$	$< 3.4 \times 10^{-14}$
Геркулес X-1	190	$< 6.6 \times 10^{-14}$	$< 1.6 \times 10^{-14}$

Таблица 1.3: Верхние пределы на поток фотонов по данным установки CASA-MIA для двух выборок. Все единицы $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

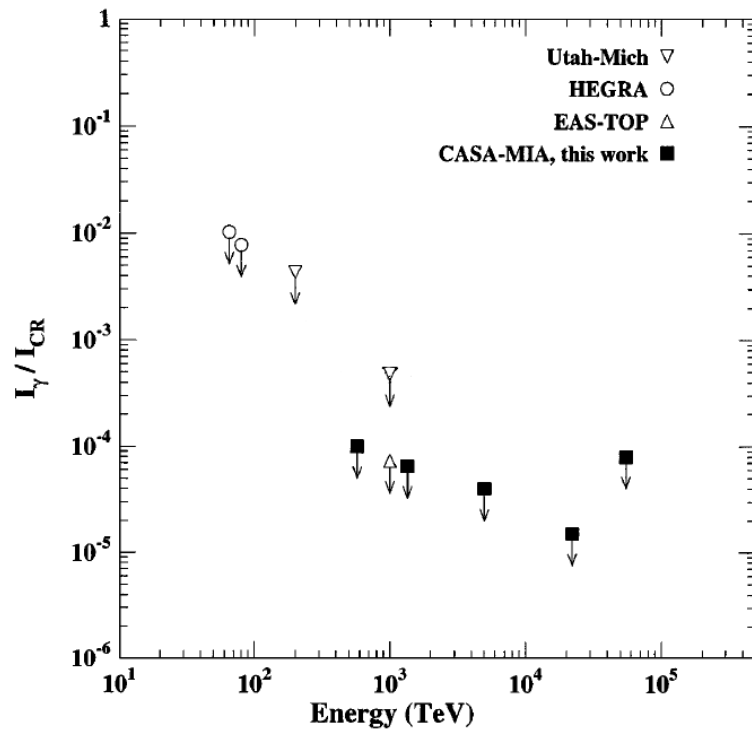


Рисунок 1.17 — Измерения доли гамма-лучей по отношению к космическим лучам сверхвысоких энергий. Точки со стрелками представляют верхние пределы из экспериментов Юта-Мичиган [48], HEGRA [49] и EAS-TOP [46] и CASA-MIA [52], как указано в легенде.

1.3 Современное состояние гамма–астрономии сверхвысоких энергий

1.3.1 Гамма–астрономия сверхвысоких энергий и нейтринная астрофизика

Несмотря на достижения гамма–астрономии в области энергий более 100 ТэВ, полученные в девяностых годах, всеобщий интерес к этой дисциплине стал понемногу ослабевать, а многие установки прекратили свое существование. Однако развитие нейтринной астрофизики и многоканальной астрономии смогло исправить эту ситуацию. Большую роль в этом сыграла нейтринная обсерватория IceCube [53], расположенная на Южном полюсе, представляющая собой детектор высокоэнергетических нейтрино объемом в кубический километр, встроенный в лед на Южном полюсе и установки IceTop для регистрации ШАЛ, как показано на рисунке 1.18.

В 2013 году коллаборация IceCube сообщила о регистрации [9] нейтрино в области энергий от 30 до 1200 ТэВ, которые ранее не наблюдались. Причем значимых пространственных корреляций между пришедшими событиями не были обнаружены, рисунок 1.19, что делает невозможным идентифицировать их источники. Несмотря на то, что позже было зарегистрировано высокоэнергетическое нейтрино из области блазара TXS 0506+056 [54], все зарегистрированные нейтрино не могут быть объяснены существованием точечных источников. Поэтому были разработаны различные модели их происхождения [55, 56]. Одним из наиболее вероятных сценариев является рождения нейтрино в распадах заряженных π^\pm , образующихся в адронных и фотоядерных взаимодействиях. Однако в этих взаимодействиях также будут образоваться нейтральные π^0 мезоны, распад которых будет давать дополнительный вклад в потоки гамма квантов

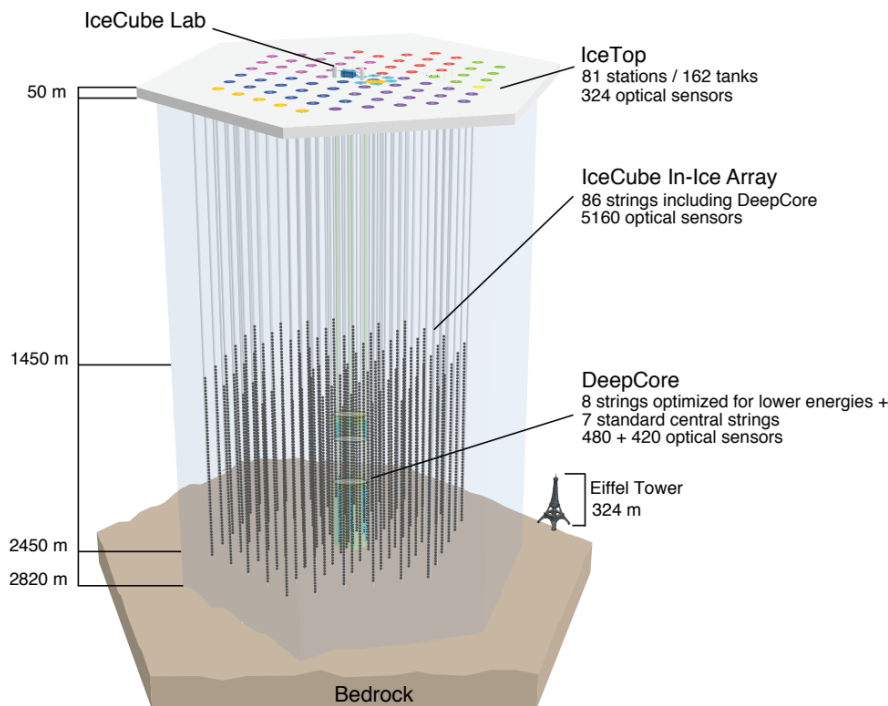


Рисунок 1.18 — Схема нейтринной обсерватория IceCube.

с энергией, сопоставимой с энергией нейтрино. Поток этих фотонов на основе данных эксперимента IceCube, были оценены, например, в работе [57].

Всеобщий интерес к этой теме привел к строительству новых и модернизации уже существующих установок по регистрации ШАЛ, образованных первичными фотонами сверхвысоких энергий. Однако достоверная информация о наблюдении диффузного гамма-излучения отсутствовала, пока коллаборация Tibet AS γ не сообщила о регистрации этого излучения, обзор их результата приведен в главе 1.3.3.

1.3.2 Открытие галактических ПэВатронов

Впервые термин ПэВатрон, которым называют астрофизические объекты, ускоряющие космические лучи до энергий порядка 10^{15} эВ, был употреблен в работе [58]. Взаимодействие космических лучей таких энергий может приво-

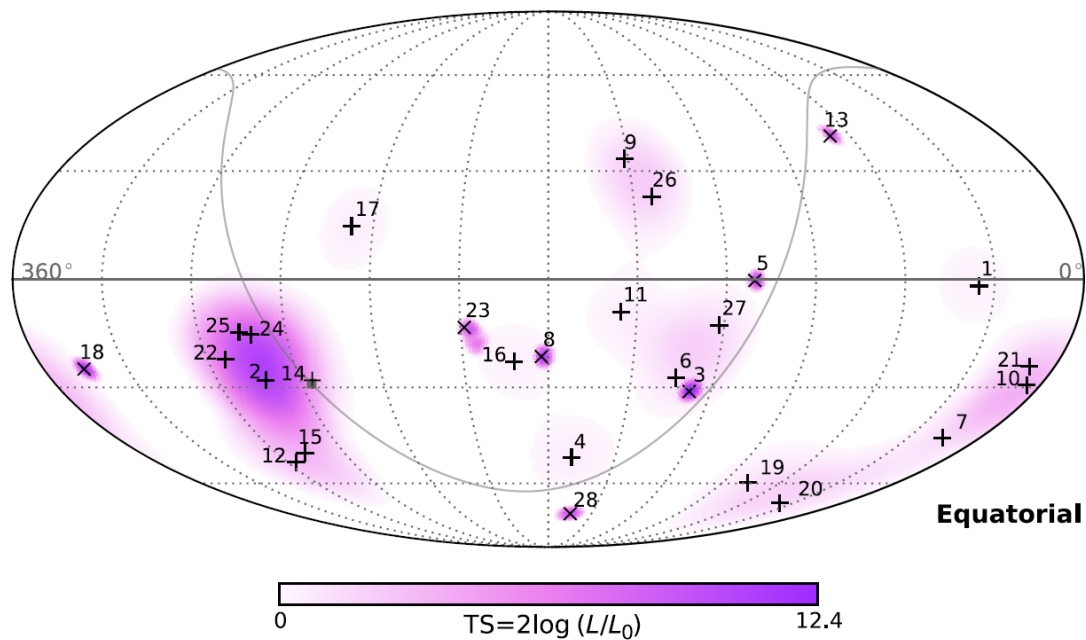


Рисунок 1.19 — Карта неба в экваториальных координатах с обозначением нейтринных событий зарегистрированных установкой IceCube.

дуть к рождению фотонов сверхвысоких энергий (более 100 ТэВ), наблюдаемых наземными установками. В качестве примера в упомянутой выше работе сверхмассивная черная дыра Стрелец А* рассматривалась в качестве такого потенциального ускорителя.

Как это было показано в главах 1.2.2 и 1.2.3, впервые гамма-излучение сверхвысоких энергий было зарегистрировано сравнительно давно. Однако в последние годы, по данным различных установок, в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий были получены значительные результаты, которые будут рассмотрены ниже.

Установка Tibet AS γ

Установка Tibet AS γ [59] впервые была запущена в 1990 году в Янбаджинге в Тибете на высоте 4300 метров над уровнем моря, что соответствует толщине

атмосферы 606 г/см^2 . За все время ее работы было несколько модернизаций, и на данный момент ее эффективная площадь составляет 36900 м^2 . На данной площади размещены 761 счетчик на основе пластического сцинтиллятора площадью 0.5 м^2 и толщиной 3 сантиметра, оснащенных быстродействующими ФЭУ с диаметром фотокатода 2 дюйма, причем 249 из них дополнительно оснащены ФЭУ диаметром 1.5 дюймов, что позволяет производить измерения временных задержек и энерговыделения в счетчике в более широком диапазоне энергий. Также на территории расположены 28 аналогичных счетчиков с 1.5 дюймовыми ФЭУ, используемых только для измерения энерговыделения. Мюонный детектор (МД) общей площадью 3600 м^2 состоит из 64 ячеек водночеренковских детекторов, находящихся на глубине 2.6 метров (2.25 м грунт и 35 см бетонное перекрытие). Каждая ячейка имеет размеры $7.15 \times 7.15 \text{ м}^2$ и глубину 1.5 метра, которая заполнена водой в качестве рабочего вещества. Черенковское излучение регистрируется с помощью трех 20 дюймовых ФЭУ (HAMAMATSU R3600), закрепленных на потолке и направленных вниз.

В июне 2019 года коллаборация сообщила [7] о “первой” регистрации фотонов с энергиями более 100 ТэВ. Очевидно, что это не совсем соответствует действительности, так как фотоны таких энергий регистрировались ранее (см. главы 1.2.2 и 1.2.3). Всего было зарегистрировано 24 фотоподобных события с энергией более 100 ТэВ относительно 5.5 ожидаемых фоновых событий, что соответствует статистической значимости 5.6σ . На рисунке 1.20 показан дифференциальный энергетический спектр фотонов Крабовидной туманности. Критерии отбора фотонных кандидатов, а также алгоритмы обработки экспериментальных данных приведены в работе [7].

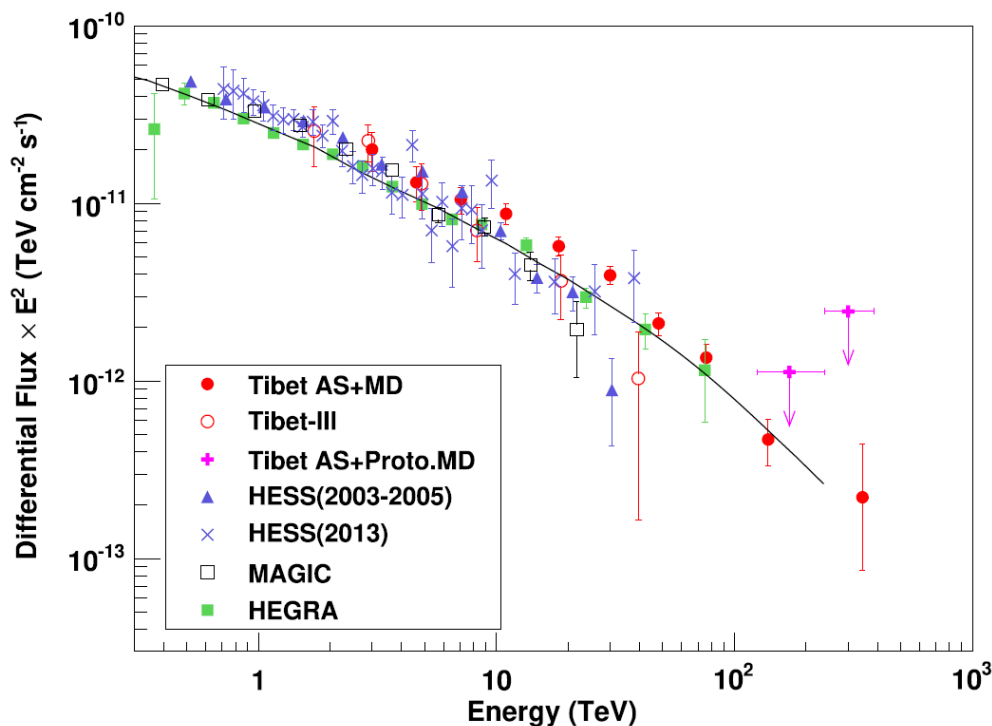


Рисунок 1.20 — Дифференциальный энергетический спектр фотонов Крабовидной Туманности по данным установки Tibet AS γ разных лет и других установок.

Установка HAWC

HAWC [60] (High Altitude Water Cherenkov) – водная черенковская обсерватория, расположенная на высоте 4100 метров в Сьерра-Негра, Мексика. Установка состоит из 300 заполненных водой резервуаров, каждый из которых оснащен тремя 8 и одним 10 дюймовыми ФЭУ. Каждый резервуар имеет диаметр 7.2 метра и высоту 4.3 метра, а их общая площадь составляет около 20000 м², из которых примерно 60% приходится на активную черенковскую среду. Большая высота и эффективная площадь черенковских детекторов позволяет регистрировать ливни с большой плотностью частиц. Это обеспечивает высокую точность реконструкции фронта ливня, что приводит к очень хорошему угловому разрешению, например, при энергиях выше 10 ТэВ оно составляет 0.1°–0.2°. Несмотря на то, что установка HAWC регистрирует первичное космическое из-

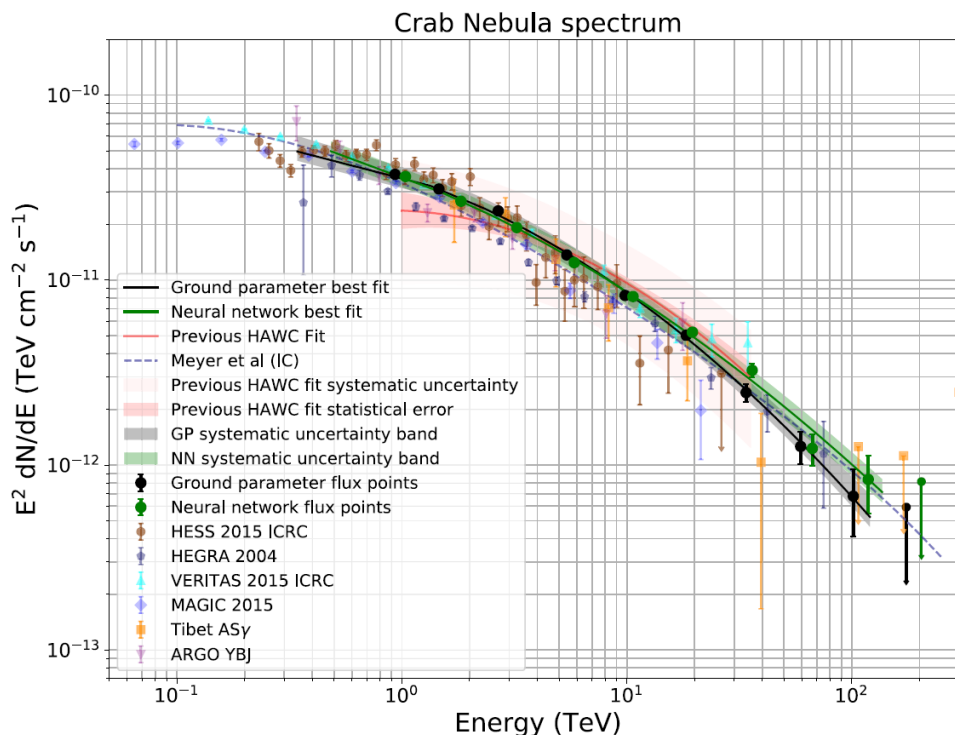


Рисунок 1.21 — Энергетический спектр фотонов Крабовидной Туманности по данным установки HAWC, полученный с помощью двух алгоритмов [61], черные и зеленые точки.

лучение меньших энергий, чем стандартные установки, она играет большую роль в гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

Через несколько месяцев после установки Tibet AS γ была опубликована работа [61] коллаборации HAWC, посвященная исследованию спектра Крабовидной Туманности для энергий вплоть до 200 ТэВ. На рисунке 1.21 показан измеренный спектр в сравнении с другими установками.

В мае 2021 года была опубликована еще одна работа [62], в которой говорилось о регистрации фотонов в области энергии от 1 до 100 ТэВ, исходящих от потенциального источника сверхвысоких энергий, Кокон Лебеда. Первое упоминание о этом источнике было в работе коллаборации Fermi-LAT [63]. Кокон Лебеда представляет сверхпузырь вокруг области активного звездообразования диаметром около 180 световых лет, расположенный в созвездии Лебеда и содержащий два молодых звездных скопления Лебедь OB2 и NGC 6910. На рисунке 1.22 показан энергетический спектр зарегистрированных фотонов.

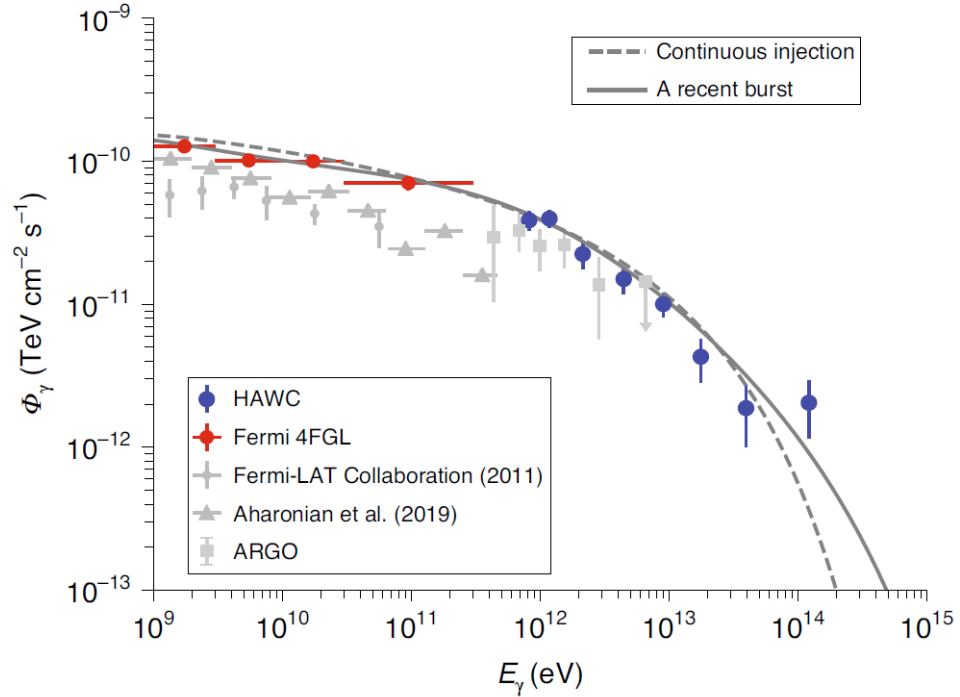


Рисунок 1.22 — Энергетический спектр фотонов Кокона Лебедя по данным установки HAWC [62], в сравнении с другими установками.

Установка LHAASO

Самой большой, на данный момент, установкой по регистрации широких атмосферных ливней является LHAASO [64] (Large High Altitude Air Shower Observatory), расположенная в Китае на высоте 4400 метров над уровнем моря, общий вид установки показан на рисунке 1.23. Установка состоит из трех основных элементов.

Первым является массив детекторов элементарных частиц KM2A площадью 1 км^2 , состоящий из 5195 наземных детекторов для регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ, и 1171 подземного мюонного детектора. Наземные детекторы имеют площадь 1 м^2 и состоят из четырех пластиковых сцинтилляторов размерами $100 \times 25 \times 1 \text{ см}^3$ (Д \times Ш \times В), поверх сцинтиллятора располагается свинцовая пластина с размерами $100 \times 25 \times 0.5 \text{ см}^3$ (Д \times Ш \times В) каждая, которые используются для преобразования фотонов, входящих в состав ШАЛ,

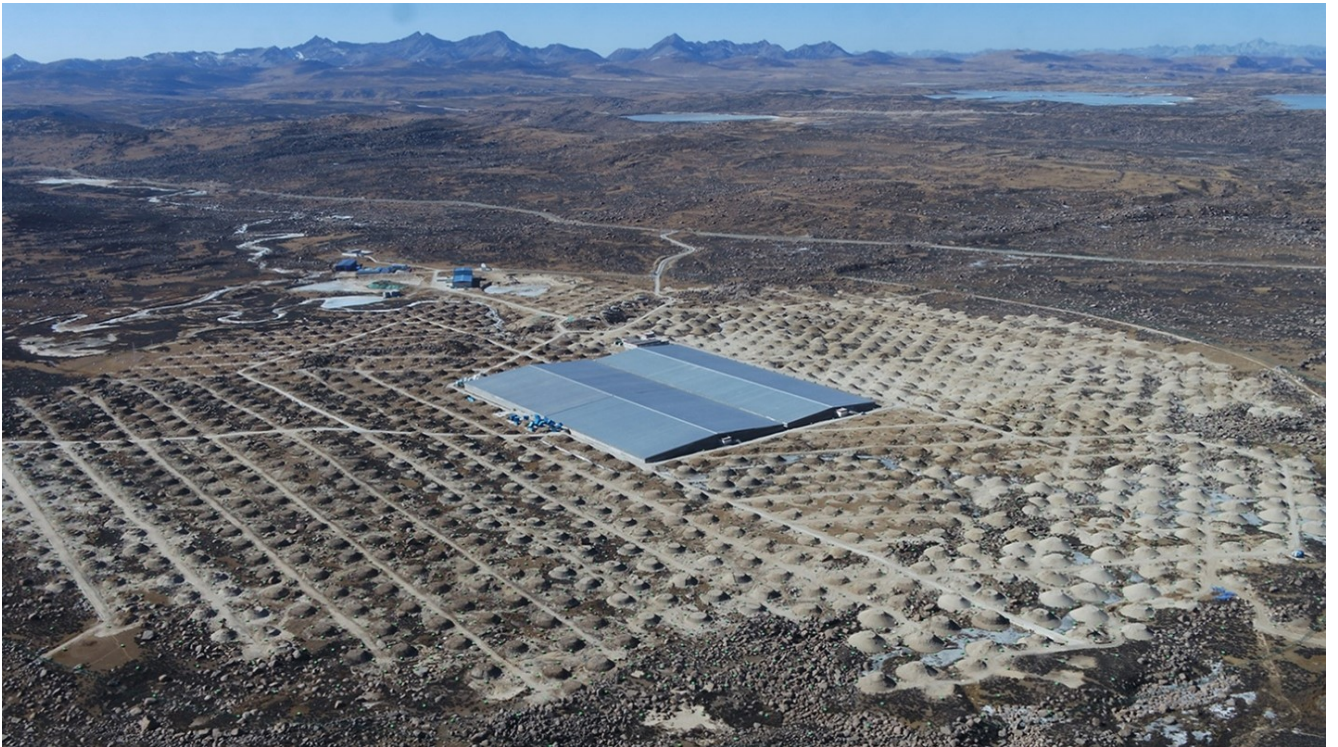


Рисунок 1.23 — Общий вид установки LHAASO.

в электроны для повышения эффективности их регистрации. Подземные мюонные детекторы представляют собой водные черенковские детекторы цилиндрической формы с диаметром 6.8 метра и высотой 1.2 метра, заполненные сверхчистой водой. Восьмидюймовый фотоэлектронный умножитель расположен в верхней центральной части цилиндра. Над детектором располагается слой грунта толщиной 2.5 метра, используемый для поглощения мягкой компоненты ШАЛ и соответствующий пороговой энергии 1.3 ГэВ для вертикальных мюонов. Основное назначение этих детекторов – это измерение мюонной компоненты ШАЛ для последующего адрон–фотонного разделения ливней.

Вторая часть установки – это WCDA (Water Cherenkov light Detector Array), представляющий собой водный черенковский детектор общей площадью 7800 м², расположенный в центре установке на рисунке 1.23. WCDA разделен на 3 водных бассейна, состоящих из 3120 блочных детекторов, каждый блок имеет размеры 5×5 м² и глубину 4.4 метра, каждый блок отделен от соседних светоизоляцией во избежание перекрестного срабатывания. Каждый блок оборудован двумя ФЭУ, один из которых крупногабаритный, расположенный по

центру блока. Второй, малогабаритный, располагается рядом с первым, и необходим для увеличения диапазона измерений при регистрации ливней высоких энергий.

Третью частью установки является WFCT (Wide Field Cherenkov light Telescopes) включающая 18 широкоугольных черенковских телескопов. Каждый телескоп состоит из оптической собирающей системы, матрицы кремниевых ФЭУ (SiPM), считывающей электроники, системы калибровки и системы управления телескопом. Вся электроника находится в одном контейнере, который установлен на шасси для удобного перемещения и регулирования горизонтальных углов в диапазоне от 0 до 90 градусов. Телескопы предназначены для регистрации черенкового и флуоресцентного излучения, образующегося в атмосфере при прохождении заряженных частиц в составе ШАЛ.

Одним из значимых результатов, полученных на установке LHAASO является открытие ПеВатронов [8]. В своей работе они сообщили об обнаружении более 530 фотонов с энергиями от 100 ТэВ и до 1.4 ПэВ от 12 источников γ -излучения сверхвысоких энергий со статистической значимостью более семи стандартных отклонений. На рисунке 1.24 показана карта неба для фотонов с энергией более 100 ТэВ, на которой обозначены зарегистрированные источники.

1.3.3 Регистрация диффузного гамма-излучения

Как было показано в главе 1.3.1, регистрация диффузного гамма-излучения сверхвысоких энергий позволила бы частично объяснить потоки нейтрино высоких энергий, регистрируемые установкой IceCube.

Первой о регистрации сообщила китайская коллаборация Tibet AS γ , 5 апреля 2021 года была опубликована работа [10], в которой сообщалось о наблюдении галактического диффузного гамма-излучения в диапазоне от 100 ТэВ

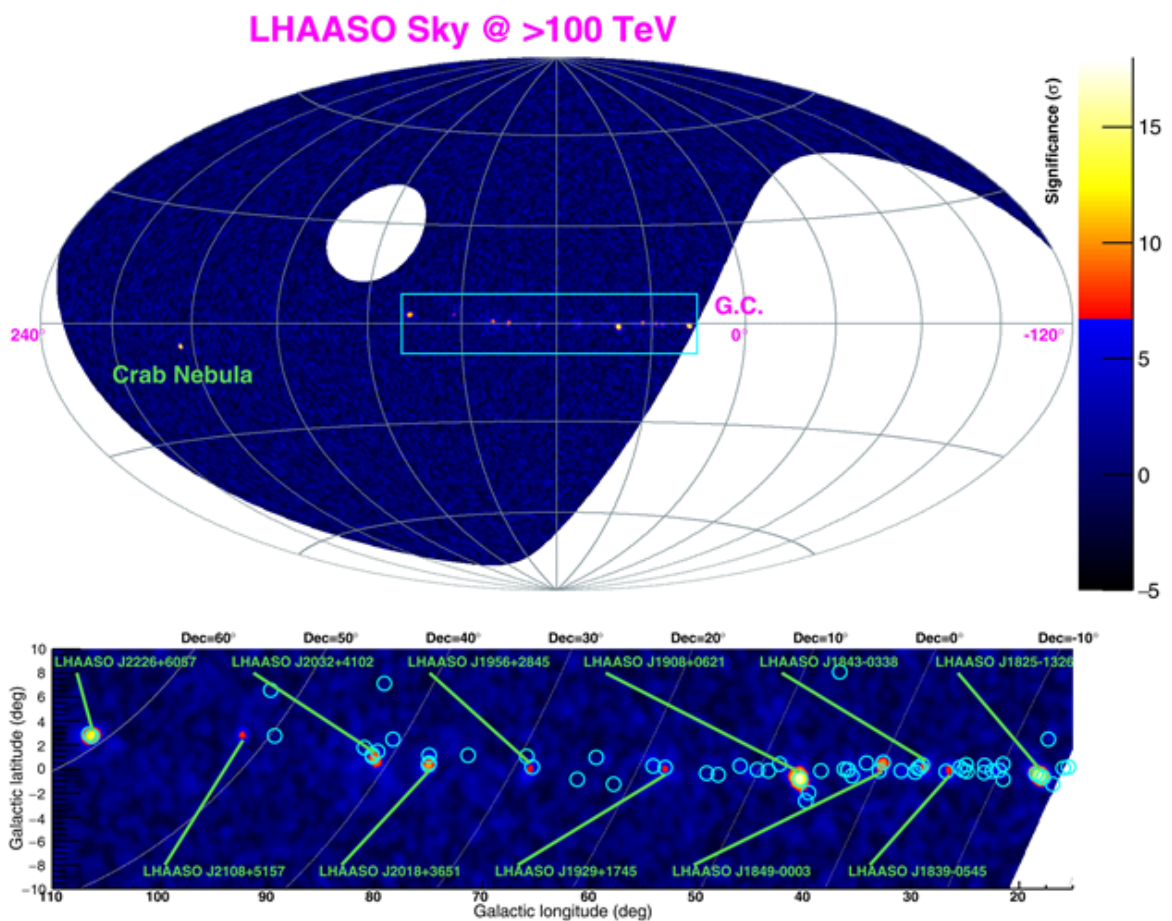


Рисунок 1.24 — Сверху: карта неба для энергий выше 100 ТэВ по данным установки LHAASO. Кружками показаны положения известных источников γ -излучения очень высоких энергий (>100 ТэВ).

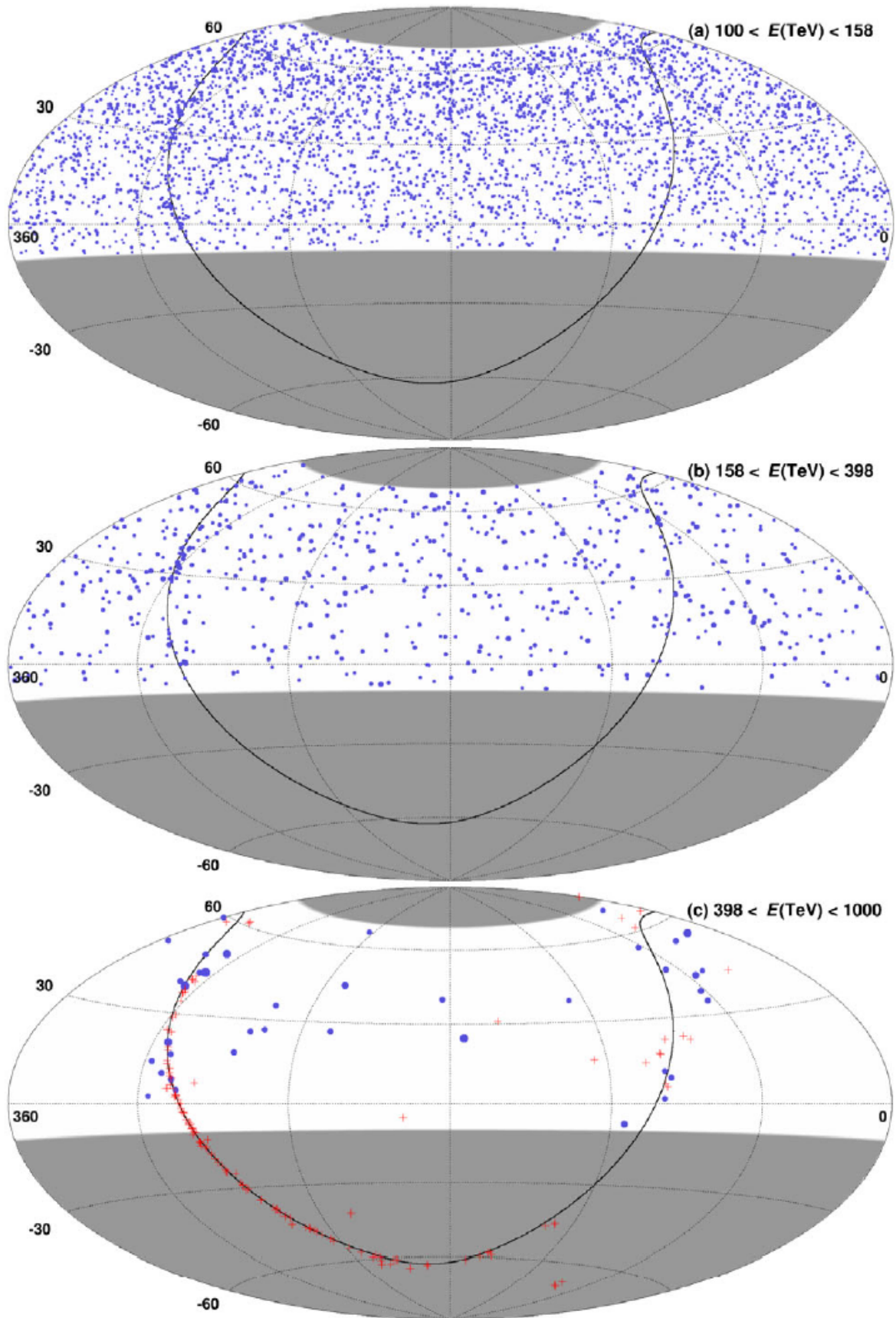


Рисунок 1.25 — Пространственное распределение диффузных фотонов зарегистрированных Tibet AS γ .

до 1 ПэВ. На рисунке 1.25 показано пространственное распределение фотонов, для трех энергетических порогов. Причем для энергий более 398 ТэВ было зарегистрировано 23 фотоноподобных события относительно 2.73 фоновых события, что соответствует статистической значимости 5.9 стандартных отклонений. Причем для направлений прихода событий с энергиями более 398 ТэВ не наблюдалось значимого превышения над фоном в области энергий более 10 ТэВ, что дополнительно подтверждало отсутствие каких-либо источников в этой области неба. Потоки диффузного гамма-излучения, полученные в эксперименте, в целом согласуются с моделями, предполагающими адронное происхождение космических лучей.

2. Установка «Ковер–2» БНО ИЯИ РАН

2.1 Наземная часть установки

После продолжительной работы, начиная с 1974 года, установка «Ковер» Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН была модернизирована и получила название «Ковер–2» [65], общий план установки показан на рисунке 2.1.

Установка расположена на высоте 1700 метров над уровнем моря, соответствующей глубине атмосферы 840 гр/см². Наземная часть установки состоит из центрального детектора «Ковер» и шести выносных пунктов регистрации.

Центральный детектор находится в помещении с бетонной крышей, соответствующей толщине 29 гр/см² и состоит из 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора, которые более подробно описаны в главе 2.1.1. Счетчики расположены в виде квадрата со сторонами 14 метров (20×20 счетчиков), занимающих площадь около 196 м². Все счетчики разделены на 25 модулей, каждый модуль объединяет 16 счетчиков и имеет форму квадрата размером 4×4 счетчика соответственно. Анодные сигналы ФЭУ всех счетчиков каждого модуля объединяются при помощи сумматоров. Суммарный анодный сигнал с каждого модуля по кабелю длиной около 25 метров поступает на систему сбора данных в аппаратный зал.

Также вокруг центрального детектора расположено шесть выносных пунктов регистрации (ВПП), обозначены цифрами 1–6 на рисунке 2.1, причем пятый ВПП (отмечен на рисунке серым) был уничтожен во время селя в августе 2017 года. Четыре из них расположены на расстоянии 30 метров от центра установки, а два на расстоянии 40 метров. Каждый ВПП оснащен 18 счетчиками на основе жидкого сцинтиллятора, глава 2.1.1, расположенных в виде прямоугольной сетки с размером 3×6 счетчика, общая площадь ВПП около 9 м². Анодные

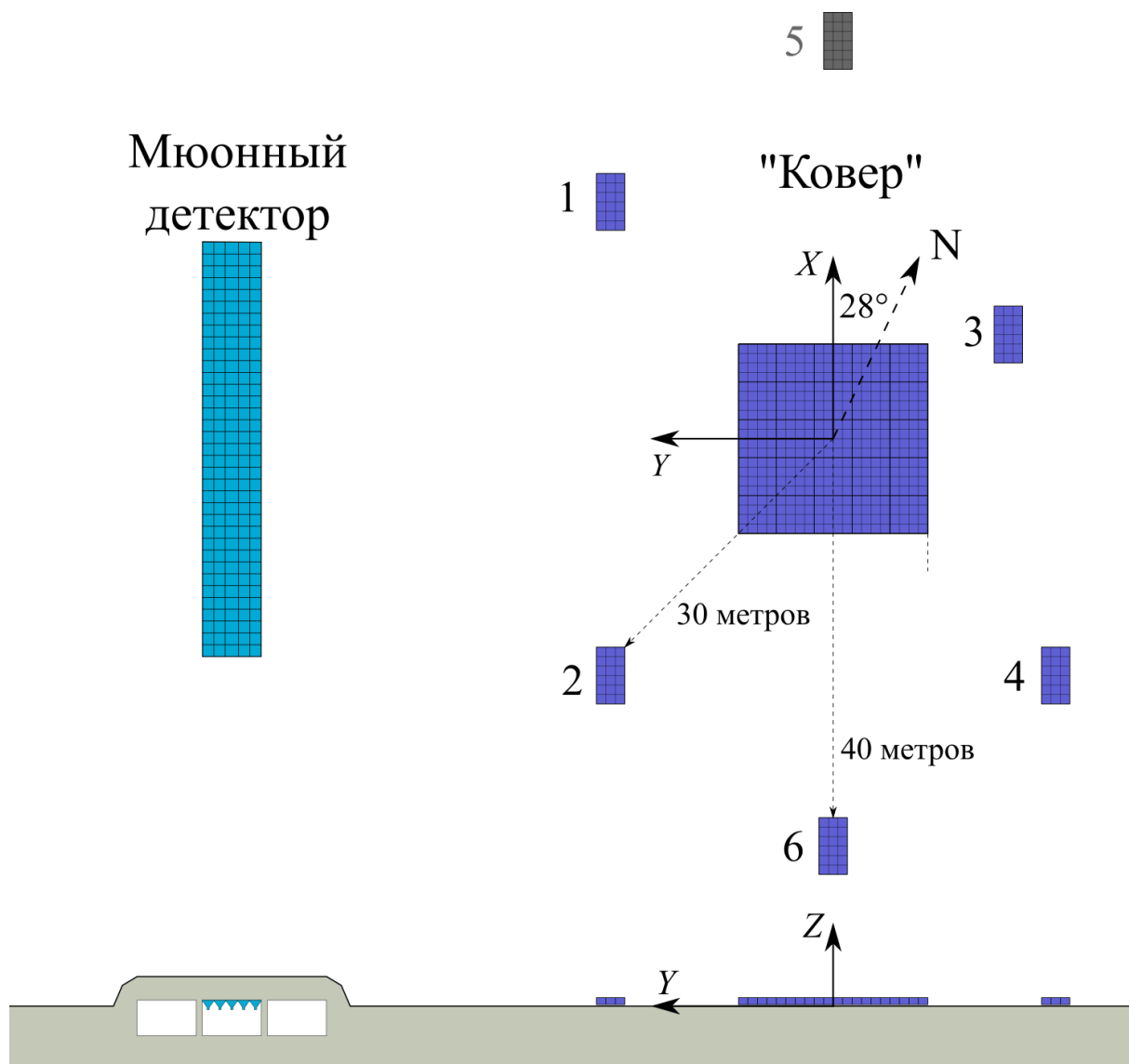


Рисунок 2.1 — Схема установки «Ковер-2».

сигналы ФЭУ всех счетчиков ВПР суммируются при помощи активных сумматоров и по кабелю длиной около 120 метров суммарный сигнал поступает на систему сбора данных в аппаратный зал.

Так как температурный режим в месте расположения установки колеблется в довольно широком диапазоне (от -20°C до $+29^{\circ}\text{C}$), а зависимость световых выхода жидкого сцинтиллятора от температуры примерно равна $0.36\ \%/^{\circ}\text{C}$. Следовательно сезонные колебания температур могут влиять на результаты измерений, а при температурах менее 5°C сцинтиллятор теряет свои свойства (примеси выпадают в осадок) и подлежит замене. Поэтому, счетчики на основе жидкого сцинтиллятора требуют обязательную термостабилизацию, что и выполнено на установке. Все счетчики ВПР расположены в утепленных помещениях, толщина крыши около $1.2\ \text{г}/\text{см}^2$; под счетчиками находятся гибкие нагревательные элементы. Контроль температуры осуществляется при помощи термостатов, обеспечивающих колебания температуры в помещении около $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$, расположенных в аппаратном зале. Несмотря на то, что «Ковер» расположен в здании, годовые колебания температур могут быть более 10°C . Поэтому вокруг детектора было построено помещение из сэндвич-панелей, крыша была выполнена из листового теплоизолирующего материала с толщиной менее $1\ \text{г}/\text{см}^2$. Для соблюдения температурного режима по периметру помещения установлены нагревательные элементы.

2.1.1 Счетчик на основе жидкого сцинтиллятора

Во всех детекторах наземной части установки «Ковер-2» используются стандартные счетчики, заполненные жидким сцинтиллятором. Каждый счетчик имеет размеры $70 \times 70 \times 30\ \text{см}^3$, корпус выполнен из алюминия толщиной 3 мм., схема счетчика показана на рисунке 2.2.

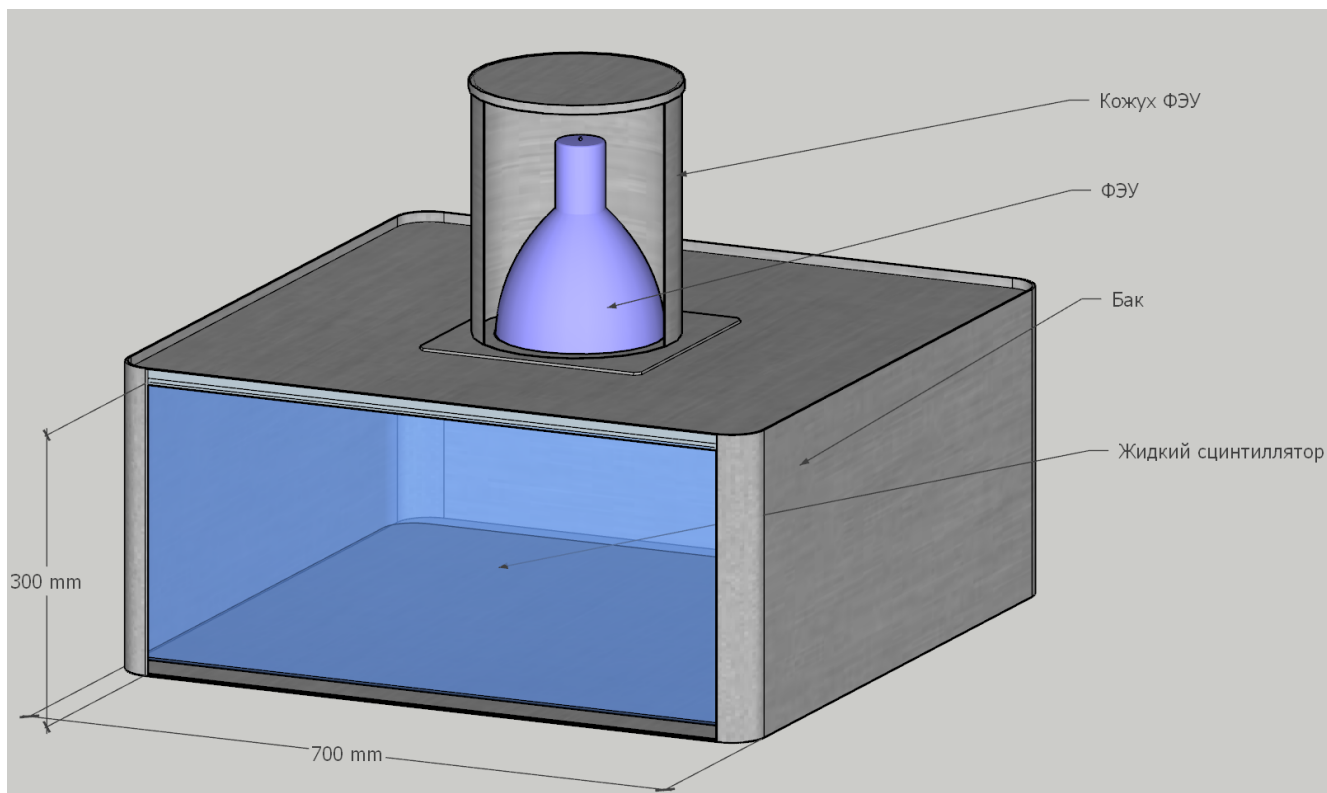


Рисунок 2.2 — Схема стандартного счетчика на основе жидкого сцинтиллятора.

Внутренние поверхности бака покрыты белой отражающей эмалью БС-57/21, с коэффициентом отражения 0.95. Сцинтиллятор на основе уайт-спирита [66], химическая формула которого имеет вид (C_nH_{2n+2} , где $n \approx 9$), плотность 0.78 г/см^3 . Сцинтиллирующей добавкой является РРО, растворенный в количестве 1 г/л , в качестве спектросместительной добавки (шифтера) выступает РОРОР с количеством растворенного вещества 0.03 г/л . Светосбор осуществляется с помощью ФЭУ-49Б имеющего диаметр фотокатода 15 см и расположенного по центру верхнего основания бака. Для повышения однородности светосбора по всему объему счетчика устанавливается иллюминатор толщиной 10 см , выполненный из оргстекла. При прохождении вертикального мюона наиболее вероятное энерговыделение составляют около 50 МэВ , которое называется одной релятивистской частицей (р.ч.).

Каждый ФЭУ оборудован делителем напряжений (ДН), на который подается напряжение 1650 вольт для счетчиков центрального детектора («Ковер»)

и 1800 вольт для ВПР. Причем каждый делитель напряжений оборудован потенциометром, который позволяет производить индивидуальную подстройку коэффициентов усиления ФЭУ. С каждого ДН счетчика снимается анодный сигнал, поступающие на сумматоры модулей, также с 7 диода каждого счетчика снимается сигнал, поступающий на логарифмический LC преобразователь, расположенный на кожухе ФЭУ. На выходе преобразователя формируется сигнал переменной длительности (10–500 мкс), где длительность пропорциональна логарифму амплитуды в счетчике, а как следствие и энерговыделению. Сформированные сигналы поступают на систему сбора данных, расположенную в аппаратном зале.

2.1.2 Управляющий сигнал “Мастер”

Мастером или триггером является управляющий сигнал, который используется для открытия измерительного окна и разрешения записи информации о событии системой сбора данных. На установке «Ковер–2» используется мастер, генерируемый схемой совпадений. Блок–схема, демонстрирующая принцип работы управляющего сигнала, показана на рисунке 2.3.

Сигнал суммы Ковра ($\Sigma 400$, рис. 2.3), получаемый путем суммирования анодных сигналов 25 модулей Ковра (Σ_{16} , рис. 2.3), поступает на временной дискриминатор ($ВД_{\Sigma 400}$) с плавающим порогом, где минимальный порог его срабатывания равен 15 р.ч.

ВД с плавающим порогом [67, 68, 69] представляют собой электронные устройства позволяющие осуществлять временную привязку анодных сигналов с высокой точностью, в широком диапазоне амплитуд. Принцип работы такого ВД показан на рисунке 2.4), аналоговый сигнал разветвляется два, причем один из них ослабляется и инвертируется (INV), второй сигнал проходит ли-

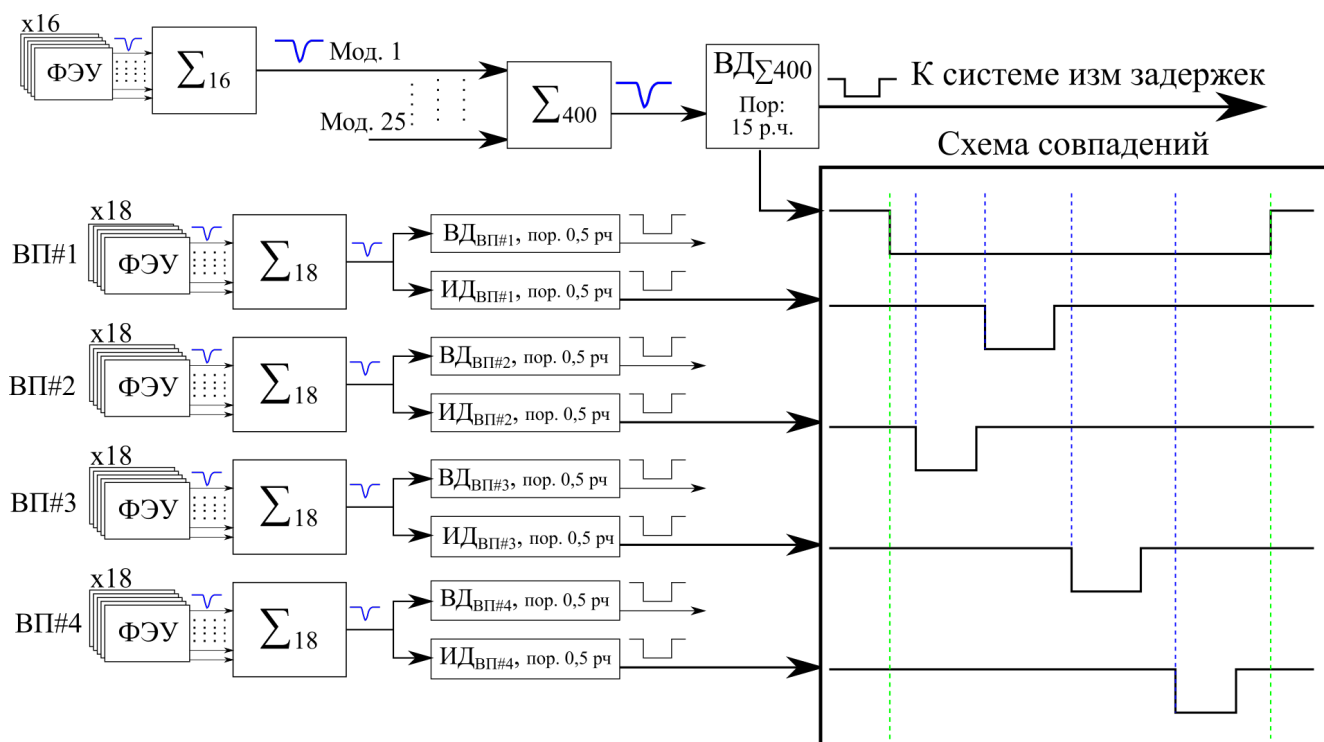


Рисунок 2.3 — Блок-схема генерации управляющего сигнала, описание в тексте.

нию задержки (DEL). Величина задержки (DEL) и коэффициента ослабления, инвертируемого сигнала, зависят от типа используемого ФЭУ и его выходных сигналов. После чего, оба сигнала подаются на аналоговый сумматор (ADD), выходной сигнал (рис. 2.4 справа) имеет точку перехода через ноль. Она имеет одинаковое положение для импульсов в широком диапазоне амплитуд и соответствует амплитуде переднего фронта импульса около 20%, относительно её максимального значения. Далее, относительно точки перехода через ноль формируется логический сигнал, передний фронт которого соответствует порогу срабатывания ВД.

В случае превышения порога дискриминатора ($ВД_{\Sigma 400}$) генерируется сигнал стандарта NIM, который поступает на схему совпадений и своим передним фронтом открывает окно для поиска совпадений с четырьмя ВПР, а задний фронт закрывает его.

Сигналы с сумматоров четырех ВПР поступают на импульсные дискриминаторы (ИД), которые с порогом 0.5 р.ч. генерируют сигнал стандарта NIM,

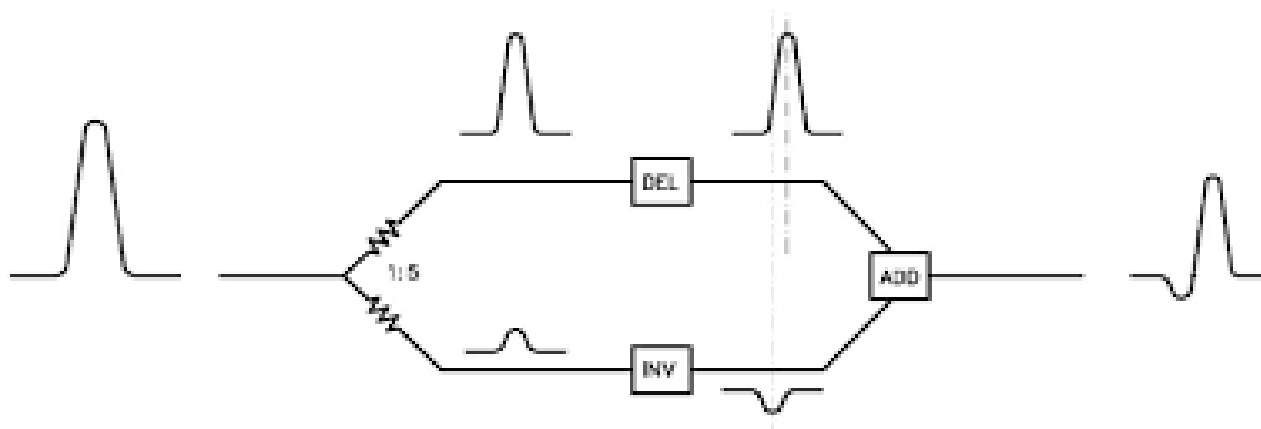


Рисунок 2.4 — Блок-схема генерации управляющего сигнала, описание в тексте.

поступающий на схему совпадений. В случае, когда сигналы от четырех ВПР попадают в окно поиска совпадений определяемого сигналом суммы Ковра, будет сформирован управляющий сигнал, который будет давать разрешение на сбор и запись данных.

2.1.3 Система сбора данных

Измерение энерговыделения осуществляется годоскопом амплитудных каналов (ГАК), измеряющим длительности импульсов с LC преобразователей каждого счетчика. Эта информация необходима для определения положения оси ливня, а также плотности частиц на расстоянии от нее, что впоследствии используется для определения энергии первичной частицы.

Измерение временных задержек необходимо для восстановления направлений прихода ливня. Для этой цели используются четыре ВПР, 1–4 на рисунке 2.1, принцип работы системы измерения временных задержек продемонстрирован на рисунке 2.5. Сигнал суммы «Ковра» (ВД $_{\Sigma 400}$) с выхода временного дискриминатора поступает на вход время-цифрового преобразователя (ВЦП), своим передним фронтом открывает измерительное окно ВЦП, имеющее фикси-

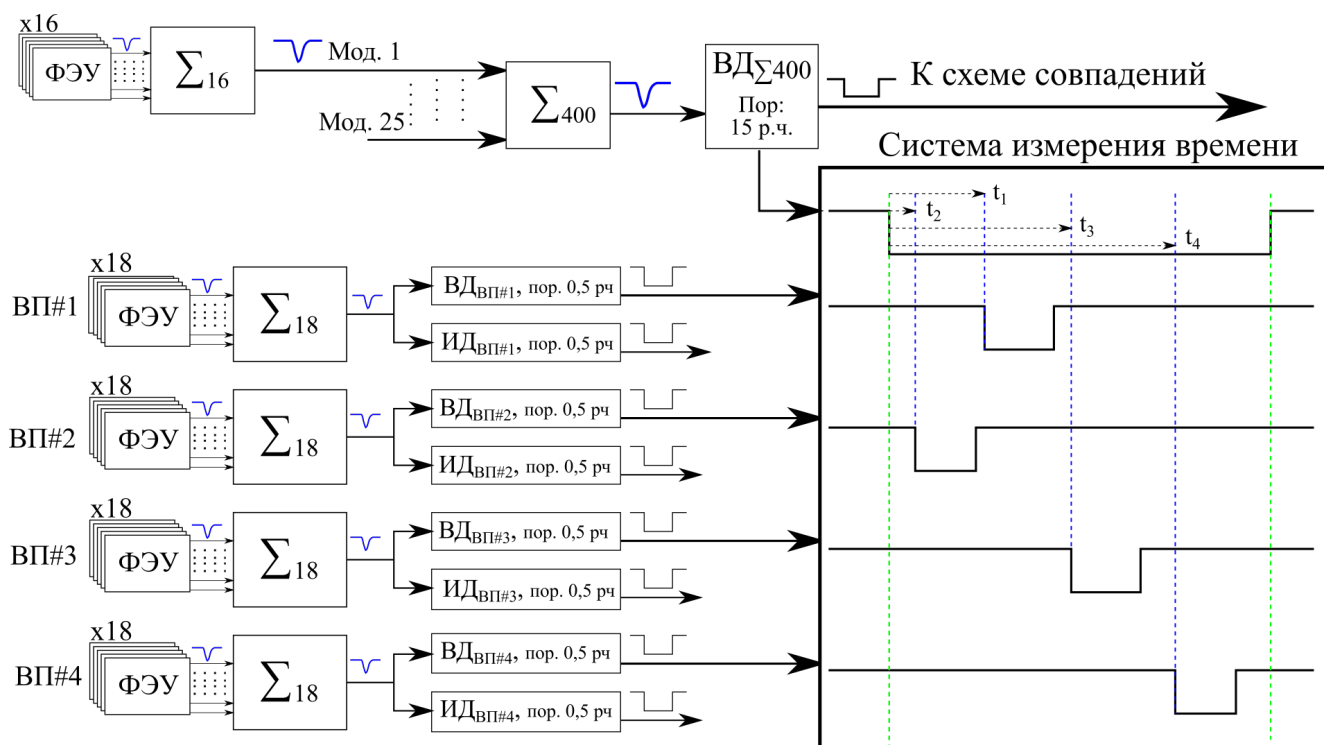


Рисунок 2.5 — Блок-схема, демонстрирующая принцип работы системы измерения временных задержек установки «Ковер-2», описание в тексте.

рованную ширину 256 наносекунд, и измеряет задержки с шагом 1 нс. Относительно переднего фронта, сигнала с $ВД_{\Sigma 400}$, начинается отсчет для всех четырех измерительных каналов, пока не придут индивидуальные стоповые сигналы от ВПР. Стоповые сигналы ВПР генерируются временными дискриминаторами с плавающим порогом. Поступая на измерительные каналы они прекращают счет, после чего результат измерения (t_1, t_2, t_3, t_4 на рисунке 2.5) сохраняется в память.

Временная привязка событий с точностью ± 1 миллисекунда осуществляется при помощи часов, расположенных в аппаратном зале, и связанных с системой сбора данных.

2.2 Подземный мюонный детектор

Изначально планировалось создать мюонный детектор (МД), состоящий из трех параллельных туннелей, которые будут оборудованы полиэтиленовыми мешками, заполненными жидким сцинтиллятором [70], однако от этой идеи отказались. В конечном счете мюонный детектор установки «Ковер-2» [71] включал три туннеля, центр среднего находился на расстоянии 48 метров от центрального детектора, рисунок 2.1. Каждый туннель имеет помещение для счетчиков с размерами $41 \times 5 \text{ м}^2$, а также помещение для аппаратуры. Все три туннеля соединены общим холлом для удобства обслуживания.

Счетчиками на основе пластического сцинтиллятора, описанных далее в главе 2.2.1, был оборудован только средний туннель. Он состоял из 175 счетчиков, расположенных в виде прямоугольника со сторонами 35×5 счетчиков, которые крепились основанием к потолку туннеля. Общая толщина вещества над ними, включая бетонные плиты перекрытия и слой гранитной породы примерно равнялась 500 г/см^2 , что соответствует пороговой энергии для вертикальных мюонов около 1 ГэВ.

Также МД разделен на 5 модулей, по 35 счетчиков в каждом, анодные сигналы счетчиков каждого модуля поступают на пассивный суммирующий трансформатор. После чего импульсы с каждого модуля МД поступают на зарядо-цифровые преобразователи (ЗЦП) для измерения энерговыделения в каждом модуле. Сигналы от 175 РС преобразователей поступают на годоскоп амплитудных каналов, который измеряет длительности импульсов, сформированных РС преобразователем каждого счетчика.

Управление сбором данных осуществляется при помощи сигнала “Мастер”, генерируемого схемой совпадений наземной части установки. Управляющий сигнал, поступая на систему сбора данных, инициализирует запись оцифрованных данных в файл. Временная привязка событий осуществляется при

помощи часов, расположенных в аппаратном зале установки, сигнал от которых поступает на систему сбора данных МД.

2.2.1 Счетчик на основе пластического сцинтиллятора

Стандартный счетчик на основе пластического сцинтиллятора изображен на рисунке 2.6 и имеет форму усеченной четырехгранной пирамиды. В ее основании располагается поддон счетчика с размерами 1005×1005 мм², в который устанавливается четыре плиты пластического сцинтиллятора, размерами 50×50 см и толщиной 5 сантиметров, обеспечивая общую площадь 1 м². Диффузор и поддон счетчика покрыты светоотражающей эмалью с коэффициентом отражения около 0.9. На высоте около 45 см от верхней поверхности сцинтиллятора располагается ФЭУ–49Б. Высоковольтное питание ФЭУ поступает на делитель напряжения от общего для всех счетчиков источника, расположенного в МД.

Каждый счетчик мюонного детектора установки «Ковер–2» оборудован логарифмическим RC–преобразователем [72, 73] для измерения энерговыделения. На преобразователь поступает сигнал с 12 динода, который преобразуется в логический сигнал переменной длительности. Причем длительность импульса пропорциональна логарифму энерговыделения в детекторе. Далее этот сигнал поступает на систему сбора данных для измерения длительности импульса.

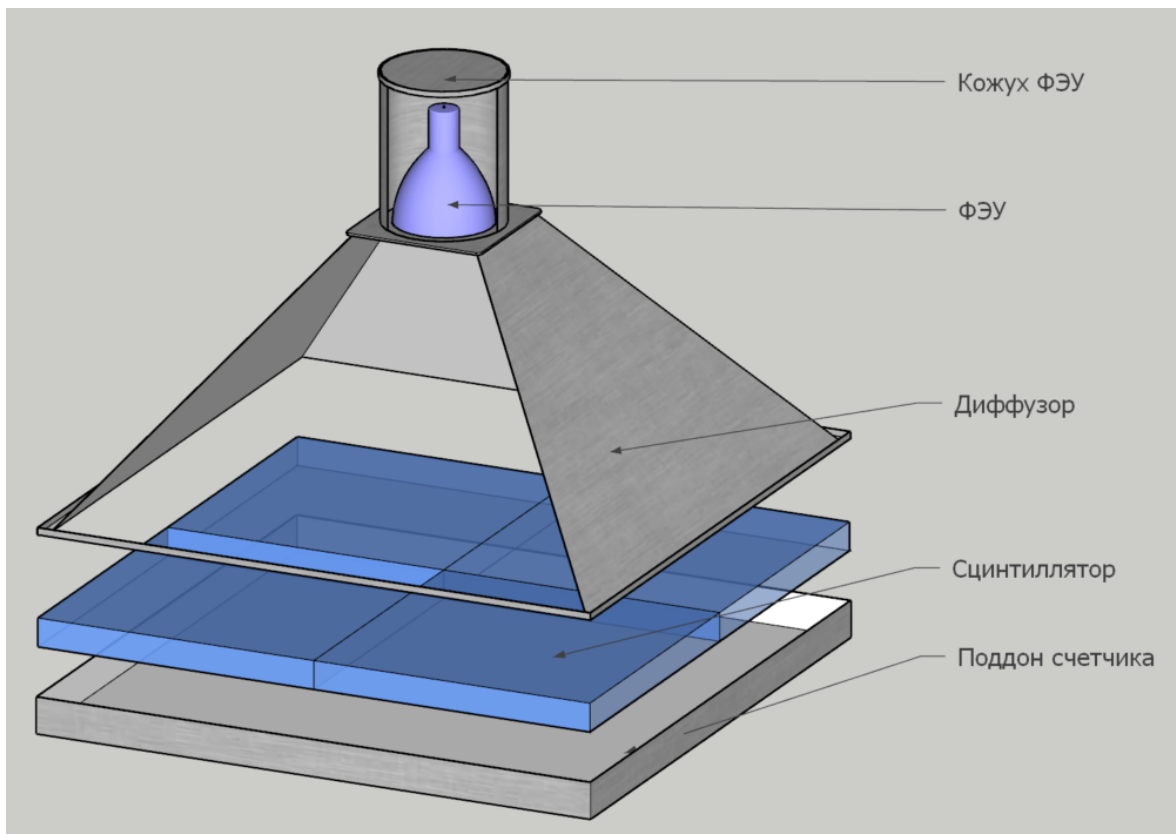


Рисунок 2.6 — Схема стандартного счетчика на основе пластического сцинтиллятора.

3. Поиск гамма—излучения сверхвысоких энергий

Так как установка «Ковер–3», текущее состояние которой описывается в главе 4, находится на стадии настройки и отладки, то ее данные не могут быть использованы для поиска гамма—излучения сверхвысоких энергий. Поэтому для поиска использовались данные, полученные на установке «Ковер–2», описанной в главе 2, которая является частью установки «Ковер–3». Методика отбора событий, анализ, а также полученные результаты представлены ниже.

3.1 Критерии отбора фотонных кандидатов

3.1.1 Восстановление параметров ШАЛ

Все данные, полученные установкой «Ковер–2», обрабатываются с целью восстановления основных параметров ливня, таких как направление прихода, размер ливня N_e и число мюонов n_μ в МД.

Направление прихода ливня описывается зенитным θ и азимутальным φ углами. Эти углы могут быть определены при помощи временных задержек между сработавшими ВПР при прохождении через них плоскости ливня. Для восстановления углов используется метод максимального правдоподобия в приближении плоского фронта ливня, на рисунке 3.1 показаны примеры распределений событий по восстановленным углам θ и ϕ .

Для восстановления размера ливня N_e отбираются события в которых ось ливня находится внутри центрального детектора. Численное значение N_e опре-

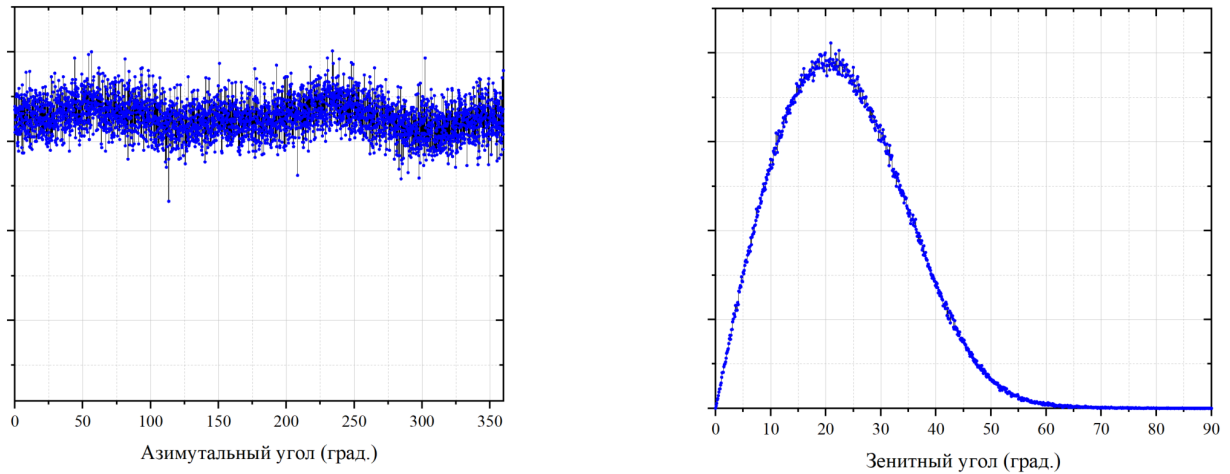


Рисунок 3.1 — Распределение восстановленных азимутальных углов (слева) и зенитных (справа).

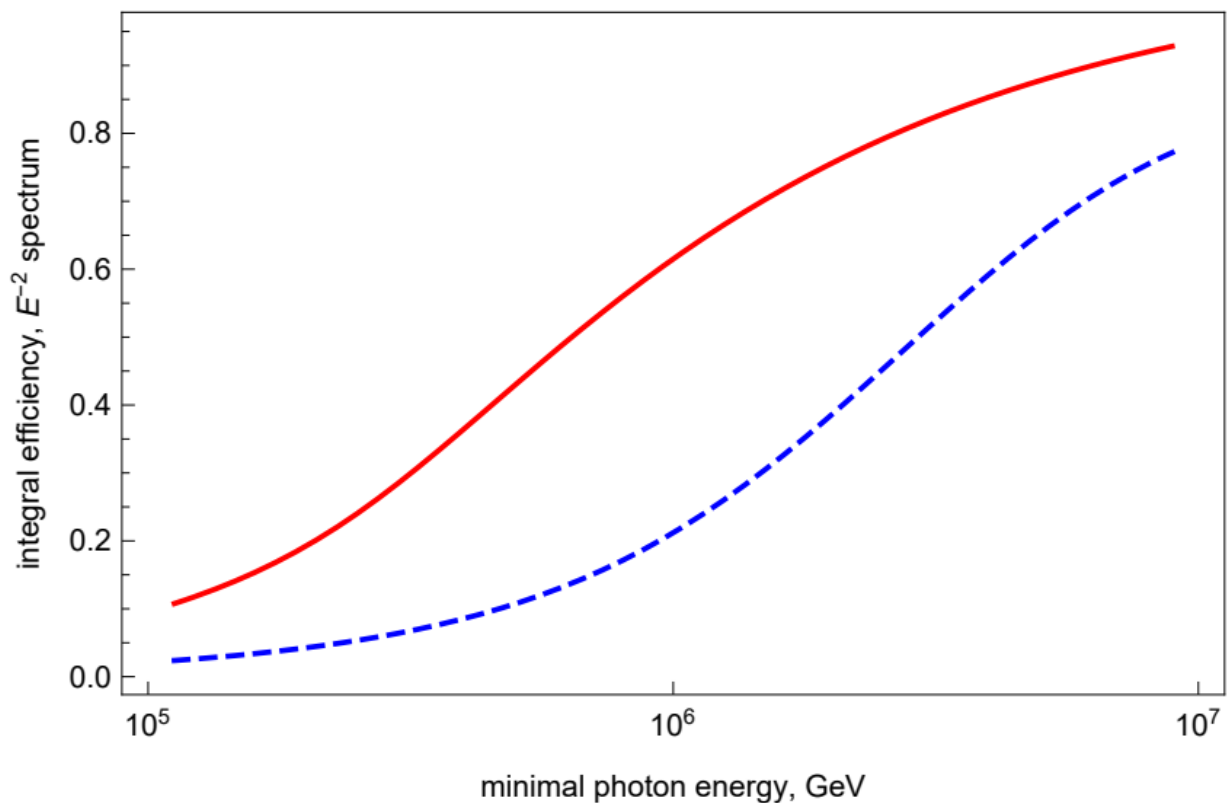


Рисунок 3.2 — Эффективность регистрации гамма-излучения с энергией $E_\gamma > E_{min}$, в предположении спектра фотонов E_γ^{-2} . Синяя пунктирная линия соответствует данным полученным с 1999 по 2011 год, а красная сплошная линия, данным с 2018 года соответственно.

деляется путем фитирования НКГ функции, 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 определяется путем суммирования измеренного, с помощью ЗЦП, энерговыделения в пяти модулях мюонного детектора и измеряется в релятивистских частицах (р.ч.). Важно заметить, что с 1999 по 2018 годов мюонный детектор работал с порогом n_μ более 1 р.ч., то есть информация о событиях с меньшим энерговыделением не записывалась. Однако для задач гамма-астрономии и поиска безмюонных событий, начиная с 7 апреля 2018 года это ограничение было снято, путем изменения системы сбора данных мюонного детектора. Данное изменения в работе МД и как следствие в анализе данных, позволило значительно повысить эффективность регистрации и снизить пороговую энергию для фотонных ШАЛ [74]. На рисунке 3.2 показано сравнение эффективностей регистрации фотонных ШАЛ, для двух наборов данных, полученное на основе Монте-Карло моделирования.

Важно заметить, что с 2011 по 2016 года, установка не работала по причине поломки системы измерения временных задержек. Небольшое количество дней набор данных было в период с 2016 по 2017 годов, а начиная с 2018 года установка работает в штатном режиме. Таким образом, можно выделить два набора данных: где число мюонов в МД регистрировалось с порогом $n_\mu > 1$ р.ч. (1999–2011) и $n_\mu \geq 0$ р.ч. (с 2018 года). Поэтому, для каждого из них были разработаны свои критерии отбора фотоноподобных событий.

3.1.2 Критерии отбора фотоноподобных событий

После восстановления параметров ШАЛ, таких как N_e , n_μ , θ и φ , все события проходят первичный отбор, условия которого приведены ниже:

- Количество сработавших счетчиков установки «Ковер» ≥ 300 ;
- Общее число частиц N_e в ливне $\geq 10^4$;
- Горизонтальный угол $\theta \leq 40^\circ$;
- Число мюонов n_μ в МД $1 < n_\mu < 250$ (до 2018 года);
 $0 \leq n_\mu < 250$ (после 2018 года).

Критерий первичного отбора для мюонов в МД, как писалось выше, зависел только от работы электроники системы сбора данных. Причем ранний критерий $n_\mu > 1$ соответствует фотонам с пороговой энергией $E_\gamma \geq 1$ ПэВ, а $n_\mu > 0$ – пороговой энергии $E_\gamma \geq 300$ ТэВ.

Для разделения фотонных и адронных ШАЛ используется принцип о котором сообщалось в главе 1.1.3. Он основан на том, что мюоны в ШАЛ, преимущественно, рождаются в адронных взаимодействиях, которые сильно подавлены для фотонных ливней. Таким образом, мюонов в фотонных ливнях будет значительно меньше. Критерии отбора кандидатов в фотоноподобные события определялись на основе Монте–Карло моделирования, разработанном специально для установки «Ковер–2». Монте–Карло моделирование атмосферных ливней выполнялось на основе программы CORSIKA 7.4003 [75], с использованием пакетов QGSJET-01c [76] и FLUKA2011.2c [77]. Для первичных фотонов предполагался спектр E_γ^{-2} , а спектр первичных адронов подбирался для воспроизведения наблюдаемого на установке распределения числа частиц N_e . Положение оси ливня в установке определялось случайным образом, отклик каждого счетчика рассчитывался с помощью отдельной программы. После расчета отклика детектора, параметры ливня (N_e , n_μ , θ и φ) восстанавливались такими же программами, что и экспериментальные данные. Так же важно заметить,

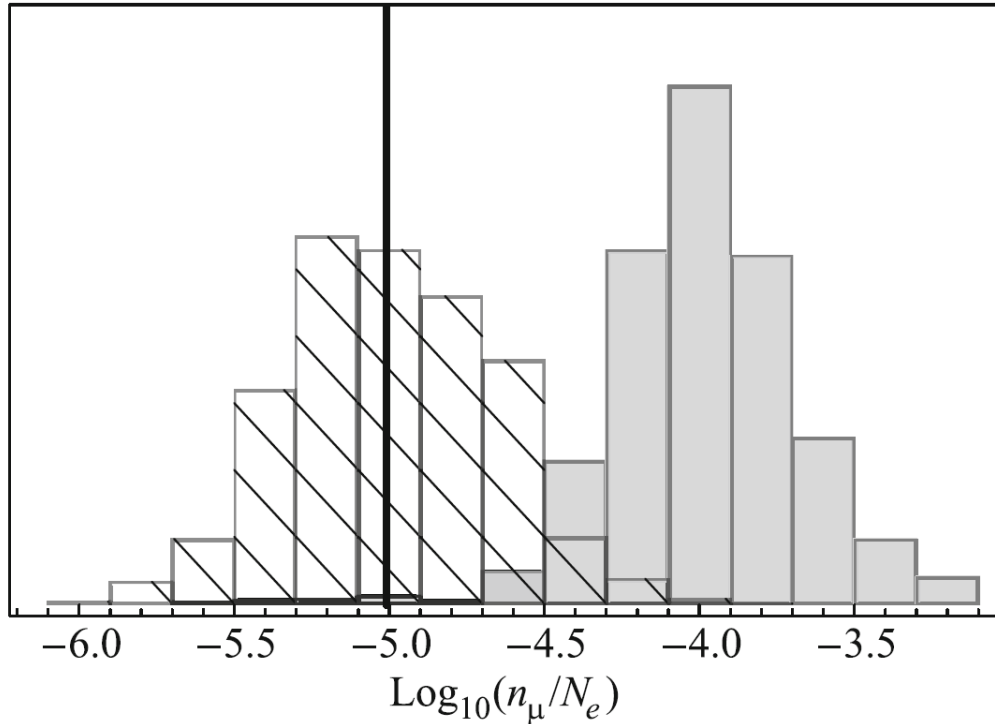


Рисунок 3.3 — Распределение n_{μ}/N_e для данных до 2018 года. Сплошные столбцы соответствуют экспериментальным данным, штрихованные столбцы соответствуют распределению для фотонов, полученных с помощью Монте–Карло моделирования. Жирная вертикальная черта является критерием отбора фотонных кандидатов.

что моделирование производилось для каждого набора данных (до 2018 года и после) отдельно.

Критерий отбора кандидатов в фотоподобные события определялся исходя из n_{μ}/N_e распределения, показанного на рисунке 3.3, данная методика была реализована опираясь на работу, например [78]. Можно заметить, что экспериментальные данные достаточно хорошо разделяются, относительно смоделированных фотонных событий. Таким образом, критерии фотоподобных событий могут быть определены двумя условиями: $N_e \geq N_e^0$ и $n_{\mu}/N_e \leq C$. Где N_e^0 – минимальное число частиц зарегистрированное установкой, по данным Монте–Карло моделирования, при прохождении 95% ливней с пороговой энергией E_{γ}^0 . А критерий C (вертикальная линия на рис. 3.3) определяет так называемую “фотонную медиану”, которая составляет 50% относительно всех фотонных

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

Таблица 3.1: Критерии отбора кандидатов в фотоподобные события установки «Ковер-2», для двух наборов данных.

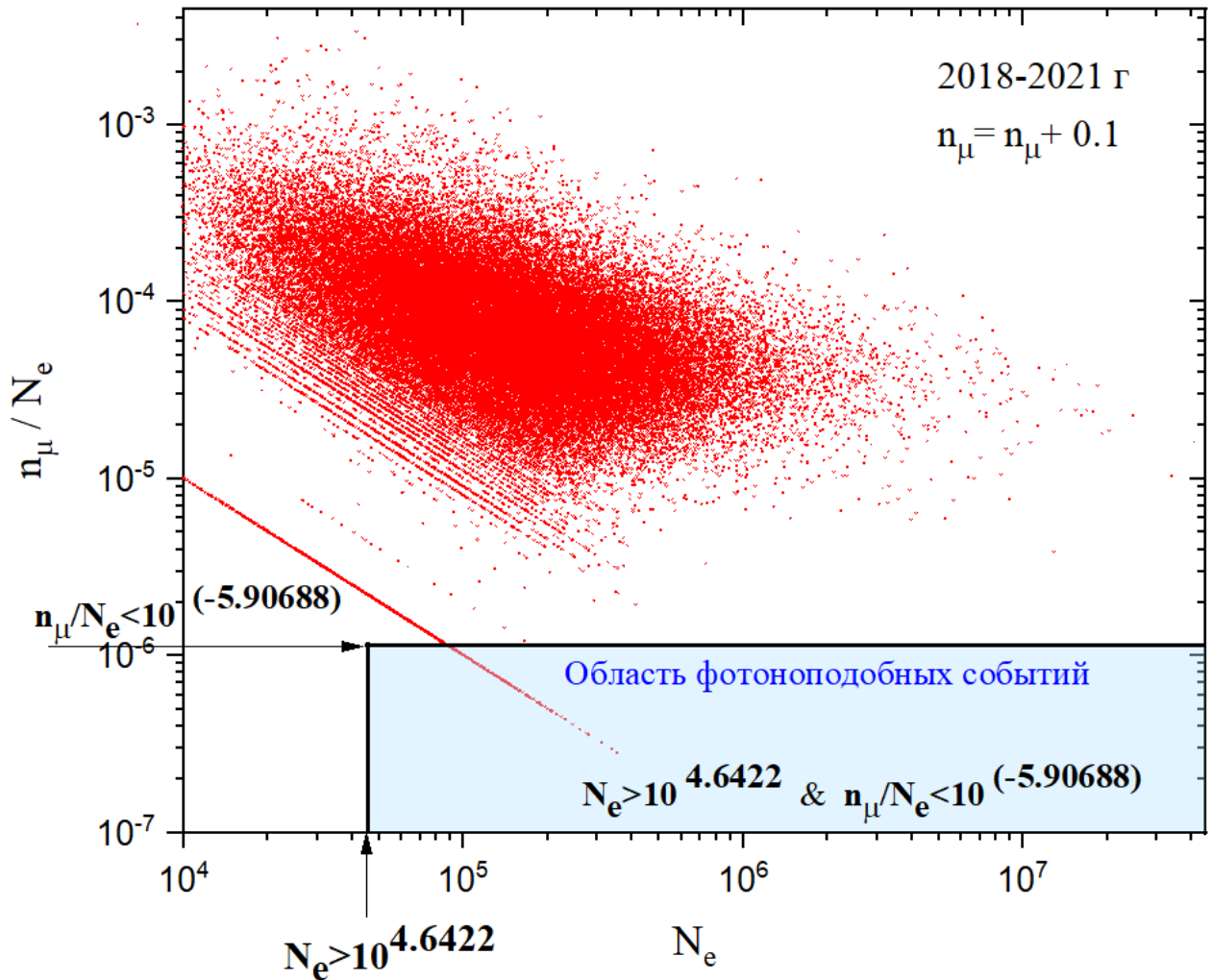


Рисунок 3.4 — Распределение $N_e - n_\mu / N_e$ для событий зарегистрированных в 2018–2021 годах и прошедших отбор. Голубым отмечена область локализации фотоподобных событий.

ливней восстановленных программой моделирования. Критерии N_e^0 и C , полученные по данным моделирования для двух наборов данных приведены в таблице 3.1. На рисунке 3.4 показано N_{e-p_μ}/N_e -распределение зарегистрированных событий с отмеченной областью кандидатов в фотонные ШАЛ, соответствующее новым критериям отбора (после 2018 года).

3.2 Поиск совпадений фотонов сверхвысоких энергий с оповещениями IceCube и HAWC

Происхождение астрофизических нейтрино высоких $E_\nu \geq 100$ ТэВ энергий, регистрируемых нейтринной обсерваторией IceCube, до сих пор представляет большой интерес для современной астрофизики, глава 1.3.1. Поэтому поиск гамма-излучения сверхвысоких энергий, имеющих пространственные и временные корреляции с нейтринными событиями, зарегистрированными обсерваторией IceCube, представляют фундаментальный интерес для современной астрофизики сверхвысоких энергий. Подобный анализ может помочь найти потенциальные источники фотонов сверхвысоких энергий или сделать ограничения на их потоки, что может ограничить различные модели происхождения фотонов сверхвысоких энергий. А в случае нейтрино внегалактического происхождения это поможет ограничить различные модели современной физики [79, 80], связанных с распространением гамма-излучения сверхвысоких энергий.

Для поиска пространственных и временных корреляций, с кандидатами в фотоноподобные события установки «Ковер-2», производился анализ оповещений (алертов) от установок: IceCube (глава 1.3.1) и HAWC (глава 1.3.2). Причем, поиск совпадений с оповещениями установки IceCube производился для двух наборов данных.

Поиск совпадений с оповещениями IceCube по данным 1999–2011 годов

Основной целью данного анализа являлся поиск фотонов с энергиями $E_\gamma \geq 1$ ПэВ от направлений прихода нейтринных событий, зарегистрированных установкой IceCube.

Для поиска отбирались все опубликованные, на моменты выполнения анализа, оповещения установки IceCube [81, 82, 83, 84], а также публичные оповещения по данным сервиса GCN [11] и AMON [12]. Подборка подобных нейтринных событий приведена, например, в работе [85]. На все нейтринные события накладывались дополнительные ограничения: точность локализации события должны быть лучше чем 3° и область локализации нейтринного события находится в поле зрения установки (для всего периода наблюдений). Всего данным условиям удовлетворяло 34 события, которые приведены в таблице 3.2.

По данным установки «Ковер–2», за период с 1999 по 2011 годы было накоплено 3080 дней набора данных, когда установка работала в штатном режиме. После первичного отбора было получено 115821 событие. Для поиска кандидатов в фотоподобные события использовались критерии отбора, представленные в таблице 3.1. Таким образом после отбора было получено 523 события, удовлетворивших этим условиям. Важно отметить, что установка IceCube не производила набор данных в этот временной период, поэтому в анализе рассматривались только пространственные корреляции между нейтрино и фотоподобными событиями. Только для небольшого количества событий полученного в период с 2016 по 2018 годы выполнялся поиск пространственных и временных корреляций.

Угловое разрешение установки определялось по данным моделирования и равнялось 1.8° , для 68% фотонов с энергией более 1 ПэВ. Для 90% фотонов угловое разрешение составляло 3° , данный угол и был выбран для поиска сов-

ID события	R.A., °	DEC, °	Error, °	ID события	R.A., °	DEC, °	Error, °
HES13	67.9	+40.3	1.2	DIF23	32.94	+10.22	0.52
HES38	93.34	+13.98	1.2	DIF24	293.29	+32.82	0.56
HES47	209.36	+67.38	1.2	DIF25	349.39	+18.05	2.70
HES62	187.9	+13.3	1.2	DIF27	110.63	+11.42	0.37
HES63	160.0	+6.5	1.2	DIF28	100.48	+4.56	1.08
HES82	240.9	+9.4	1.2	DIF29	91.60	+12.18	0.40
DIF2	298.21	+11.74	0.45	DIF30	325.5	+26.1	1.62
DIF4	141.25	+47.80	0.43	DIF31	328.4	+6.00	0.55
DIF5	306.96	+21.00	2.13	DIF32	134.0	+28.00	0.45
DIF7	266.29	+13.40	0.54	DIF33	197.6	+19.9	2.33
DIF8	331.08	+11.09	0.55	DIF34	76.3	+12.6	0.66
DIF10	285.95	+3.15	1.09	DIF35	15.6	+15.6	0.53
DIF12	235.13	+20.30	1.71	EHE3	46.58	+14.98	0.78
DIF13	272.22	+35.55	0.85	EHE5	77.43	+5.72	0.83
DIF16	36.65	+19.10	1.96	EHE6	340.0	+7.40	0.47
DIF17	198.74	+31.96	0.96	AHES1	240.57	+9.34	0.60
DIF20	169.61	+28.04	0.85	AHES4	40.83	+12.56	0.88

Таблица 3.2: Нейтринные события, зарегистрированные установкой IceCube, отобранные для поиска совпадений с кандидатами в фотоноподобные события установки «Ковер-2». Названия (ID) событий соответствуют работе [85]. Прямое восхождение (R.A.) и склонение (DEC) указаны в экваториальных координатах. Еггор указывает область локализации события.

падений с нейтрино высоких энергий. В итоге, в область локализации 3° для 34 нейтринных событий попало 10 кандидатов в фотонопоподобные события. Для оценки числа случайных совпадений, моделировалось изотропное распределение направлений прихода фотонопоподобных событий. В итоге число случайных совпадений равнялось 13.6, что позволяет поставить ограничения на поток фотонов, с энергией $E_\gamma \geq 1$ ПэВ от 34 направлений прихода нейтринных событий, на 95% уровне достоверности:

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

Для малого числа событий с 2016 по 2018 годы был выполнен поиск пространственных и временных корреляций. И всех событий таблицы 3.1, только одно попало в поле зрения установки «Ковер-2», когда производился набор данных. Событие ЕНЕЗ [86] (трек мюона) было зарегистрировано 10 декабря 2016 года в 20:06:40.31 UT, расчетная энергия около 100 ТэВ. Для области локализации 3° с центром в потенциальном источнике ЕНЕЗ, событий с $N_e \geq N_e^0$ не было обнаружено. Количество событий, полученных при моделировании, от случайного совпадения оценивалось как 0.02. Это позволяет сделать ограничение на флюенс для потенциального источника фотонов с энергией более 1 ПэВ, на уровне достоверности 95%: $< 5.4 \times 10^{-5}$ ПэВ/см².

Подобный поиск пространственно-временных корреляцией между гамма-излучением сверхвысоких энергий и нейтрино высоких энергий производился впервые и полученные результаты были опубликованы в работе [13].

Поиск совпадений с оповещениями IceCube и HAWC по данным 2018–2020 годов

Работа по поиску совпадений гамма-излучения сверхвысоких энергий с нейтрино высоких энергий, зарегистрированных установки IceCube, которая была описана выше, получило свое продолжение и развитие. К анализу были добавлены оповещения HAWC, гамма-излучение в области энергий от 100 ГэВ до 300 ТэВ, в направлении которых, также могут быть расположены потенциальные источники фотонов сверхвысоких энергий.

А анализе использовались оповещения, которые были описаны выше, а также с 2019 года коллаборация IceCube распространяет оповещения нового стандарта – “GOLD” и “BRONZE” [87]. Энергия подавляющего большинства нейтринных событий находится в диапазоне от 100 ТэВ и до 1000 ТэВ. Критерии отбора этих событий выбраны так, чтобы максимизировать вероятность их астрофизического происхождения, то есть вероятность оповещения типа “GOLD” иметь астрофизическое происхождение составляет 50%, а “BRONZE” – 30% соответственно.

Нововведением данного анализа является включение публичных оповещений установки HAWC [88], которая работает при более низких энергиях, но в отличие от черенковских установок она проводит круглосуточный набор данных. Эти оповещения представляют не меньшую значимость, так как диапазон измеряемых энергий очень близок к исследуемому нами. И наблюдение любых вспышек гамма-излучения с энергиями до 300 ТэВ могут быть значимым намеком на существование гамма-излучения бóльших энергий.

Для анализа использовались данные за период с 8 апреля 2018 года по 26 октября 2020 года, количество дней набора данных, за этот период, составило 675. Обработка и алгоритм отбора фотоноподобных событий описан выше, критерии отбора фотонных кандидатов приведены в таблице 3.1. Также особенно

ID события	R.A., °	DEC, °	ID события	R.A., °	DEC, °
HAWC 190806A	+78.4	6.6	IceCube 190704A	+161.8	27.1
HAWC 190917A	+321.8	40.0	IceCube 190712A	+76.5	13.1
HAWC 190927A	+248.7	21.2	IceCube 191215A	+285.9	58.9
HAWC 191019A	+217.5	25.8	IceCube 191231A	+46.4	20.4
HAWC 191208A	+228.9	40.2	IceCube 200117A	+116.2	29.1
HAWC 200314A	+255.7	48.1	IceCube 200410A	+241.3	11.6
HAWC 200814A	+177.8	19.9	IceCube 200425A	+100.1	53.6
HAWC 200815A	+11.2	11.5	IceCube 200512A	+295.2	15.8
HAWC 201019A	+203.1	29.7	IceCube 200614A	+33.8	31.6
IceCube 190331A	+355.6	71.1	IceCube 200620A	+162.1	11.9
IceCube 190503A	+120.3	6.4	IceCube 200911A	+51.1	38.1
IceCube 190619A	+343.3	10.7	IceCube 200916A	+109.8	14.4
IceCube 190730A	+225.8	10.5	IceCube 200921A	+195.3	26.2
IceCube 191001A	+314.1	12.9	IceCube 201014A	+221.2	14.4
IceCube 200109A	+164.5	11.9	IceCube 201021A	+260.8	14.6
IceCube 200530A	+254.4	27.5			

Таблица 3.3: Оповещения, по данным установок IceCube и HAWC, используемые в анализе и взятые из ресурсов GCN [11] и AMON[12].

стью этого анализа было снижение порога поиска гамма-излучения до энергий более 100 ТэВ, что стало возможно благодаря эффективному подавлению фона от космических лучей, являющегося главной проблемой, путем совместного анализа направления и времени прихода события. Для отбора фотоподобных с пороговой энергией более 100 ТэВ, на основе Монте-Карло моделирование получено значение $N_e^0 \geq 10^{4.2251}$, а для удобства обработки количество мюонов в МД принималось равным $n_\mu = 0$. Всего за указанный период первичный отбор прошло 52791 событий, количество отобранных фотоподобных событий с $E \geq 100$ ТэВ равнялось 1021 и $E \geq 300$ ТэВ – 598 событий соответственно.

Для отбора оповещений IceCube и HAWC использовались описанные выше критерии. В итоге было отобрано 9 событий зарегистрированных установкой HAWC и 22 установкой IceCube, список событий приведен в таблице 3.3. Направления прихода большинства из представленных оповещений, в момент регистрации события, находились вне поля зрения установки, однако в течении суток эти направления попадали в поле зрения установки. Также выбраны интервалы времени, для поиска совпадений с фотоподобными событиями, которые равнялись 24 часам и 30 суткам, с центром в момент регистрации события. Данные временные интервалы выбирались относительно произвольно. Область пространства, с центром в потенциальном источнике, в котором производился поиск совпадений составляла 6.15° и определялась из моделирования как угловое разрешение установки на уровне достоверности 90%.

Для каждого потенциального источника определялось наблюдаемое и ожидаемое количество фотоподобных событий, попавших в выбранную область и указанный временной интервал. Ожидаемое число событий оценивалось путем равномерного распределения времен прихода фотонов в выбранную область. Значительного превышения наблюдаемых событий над ожидаемыми не было обнаружено, ни для одного из направлений IceCube и HAWC. На основе чего, были установлены верхние ограничение на поток и флюенс фотонов с энергией более 100 и 300 ТэВ для двух временных экспозиций – 24 часа и 30 суток.

Установка		$E \geq 100$ ТэВ		$E \geq 300$ ТэВ	
		24 часа	30 суток	24 часа	30 суток
HAWC	f (10^{-11} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$)	10.2	0.77	7.84	0.55
	F (ГэВ·см $^{-2}$)	0.88	1.99	2.03	4.27
IceCube	f (10^{-11} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$)	6.82	0.81	5.28	0.32
	F (ГэВ·см $^{-2}$)	0.59	2.10	1.37	2.51

Таблица 3.4: Верхние пределы на потоки (f) и флюенс (F) гамма-излучения с энергиями более 100 и 300 ТэВ, для 9 оповещений установки HAWC и 22 оповещений установки IceCube.

Событие		$E \geq 100$ ТэВ	$E \geq 300$ ТэВ
		1000 секунд	1000 секунд
IceCube 190331A	f (10^{-11} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$)	7124	5405
	F (ГэВ·см $^{-2}$)	7.12	16.2
IceCube 191215A	f (10^{-11} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$)	1065	808
	F (ГэВ·см $^{-2}$)	1.07	2.43

Таблица 3.5: Верхние пределы на потоки (f) и флюенс (F) гамма-излучения с энергиями более 100 и 300 ТэВ, для двух нейтринных событий находившихся в поле зрения установки, на момент их регистрации.

Значения потоков и флюенса были получены как для каждого направления, указанного в таблице 3.3, так и общие для всех направлений каждой установки, которые показаны в таблице 3.4.

Направления для двух нейтринных событий IceCube 190331A и 191215A находились в поле зрения установки во время ее работы, что дополнительно позволяет оценить поток и флюенс в предположении вспышки. Для поиска потенциальной вспышки, от этих двух направлений, был выбран временной интервал 1000 секунд, а верхние ограничения на поток (f) и флюенс (F) представлены в таблице 3.5.

Представленные анализ был опубликован в работе [14] и является продолжением многоканальных наблюдений проводимых на установке «Ковер-2».

3.3 Наблюдение вспышки гамма-излучения сверхвысоких энергий из области Кокон Лебеда

Поиск пространственных и временных корреляций, между фотоподобными событиями установки «Ковер-2» и событиями зарегистрированными другими установками, в особенности нейтринной обсерваторией IceCube, который был описан в главе 3.3, принес свой результат уже в конце 2020 года.

20 ноября 2020 года нейтринная обсерватория IceCube сообщила о регистрации нейтринного события IceCube-201120A [90] с энергией 154 ТэВ, реконструкция которого изображена на рисунке 3.5. Согласно четвертому каталогу Fermi-LAT [91], внутри области локализации данного события находилось несколько потенциальных источников нейтрино, ближайшим из которых являлся Кокон Лебеда, первое упоминание о котором было в работе [63], основанной на данных телескопа Fermi-LAT. Кокон Лебеда представляет собой сверхпузырь, окружающий область звездообразования диаметром около

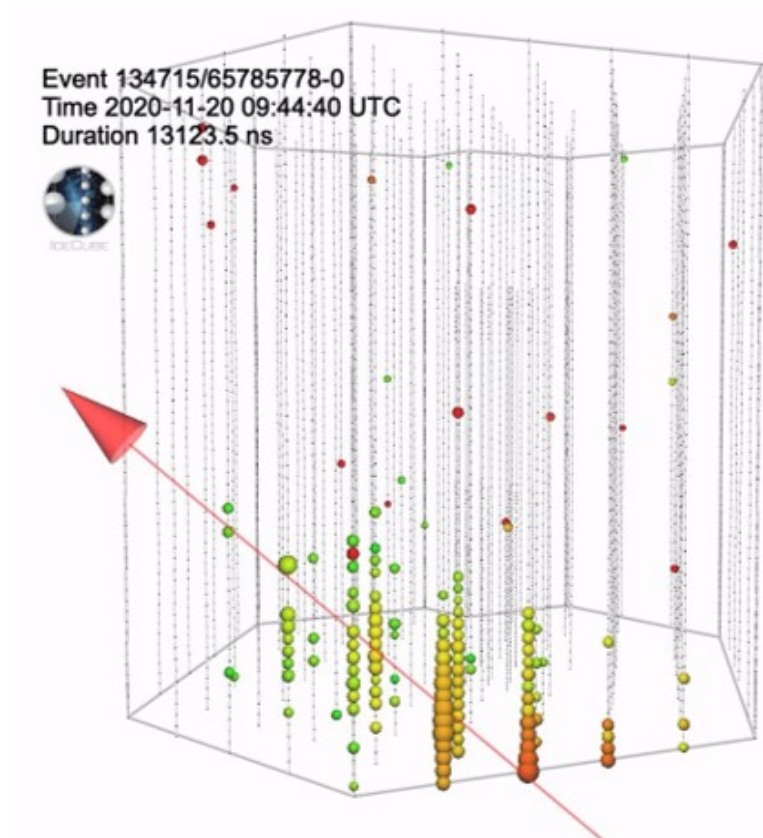


Рисунок 3.5 — Визуализация нейтринного событий IceCube–201120A.

180 световых лет, включающую две области активного звездообразования Лебедь OB2 и NGC 6910. Принимая во внимание работу [92], в которой рассматривались механизмы ускорения космических лучей в скоплениях массивных звезд и OB ассоциациях до ПэВ энергий, что делает подобные объекты вероятными кандидатами в источники нейтрино и гамма-излучения около ПэВ энергий. Другим вероятным кандидатом, входящим в ассоциацию Лебедь OB2, на роль источника нейтрино IceCube–201120A, является двойная система PSR J2032+4127/MT91 213 [93] состоящей из пульсара и звезды класса Be, наблюдаемая в широком диапазоне длин волн [94]. Среди возможных кандидатов также есть Лебедь X3, от которого уже регистрировалось гамма-излучение сверхвысоких энергий (глава 1.2.2). Расположение нейтринного события IceCube–201120A, а также его некоторые потенциальные источники показаны на рисунке 3.6. Наличие сразу нескольких мотивированных источников нейтрино IceCube–201120A стало причиной значительного интереса к этому

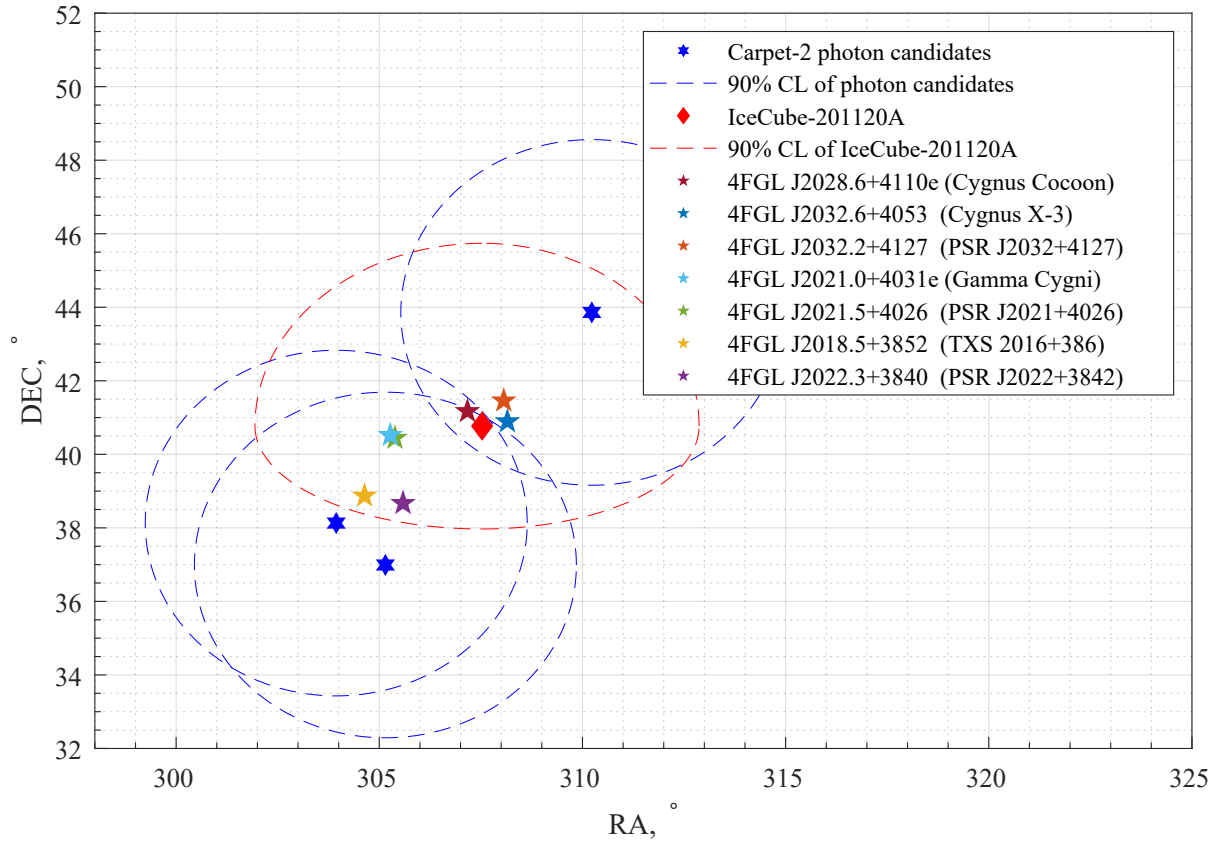


Рисунок 3.6 — Пространственное распределение фотонных кандидатов, зарегистрированных установкой «Ковер–2» и возможных источников.

событию и поиска совпадений с фотонными кандидатами, зарегистрированными установкой «Ковер–2».

Впоследствии данное событие было проанализировано на предмет корреляции, с зарегистрированными фотоноподобными событиями, во временном окне ± 12 часов, центром соответствующему времени регистрации нейтрино. По результату данного анализа, совпадений не было обнаружено и было установлено ограничение поток фотонов с энергией более 100 ТэВ, и опубликовано на портале The Astronomer’s Telegram – сообщение ATel#: 14237 [95]. Через некоторое время, повторный поиск был проведен во временном интервале ± 15 суток, при котором было обнаружено два фотоноподобных события, соответствующее сообщение было опубликовано в ATel#: 14255 [96]. Данный результат стал поводом для более детального анализа данного события, которое рассмотрено ниже.

Для анализа использовались данные для полученные с 7 апреля 2018 года по 27 апреля 2021 года и включали 829 дней набора данных. Стандартный механизм отбора событий был описан в главе 3.1.2 и по результату первичного отбора было получено 65703 событий. Дополнительный отбор событий с $N_e \geq N_e^0$ соответствующий энергетическому порогу $E \geq 300$ ТэВ, оставил 56969 зарегистрированных событий. Методы и критерии отбора фотоноподобных событий, также описаны в главе 3.1.2. Для данного анализа, угловое разрешение установки было взято из работы [37], которое определялось путем совместных наблюдений установки «Ковер-2» и атмосферного черенковского телескопа. Для 86% событий, относительно всех зарегистрированных, угловое разрешение составляло 4.7° .

Целью анализа являлся поиск корреляций между временем прихода нейтринного события и зарегистрированных фотонных кандидатов, также проверялась пространственно-временная корреляция для всех отобранных событий. Поиск производился в угловой области пространства равной 4.7° , с центром в источнике 4FGL J2028.6+4110e, соответствующему Кокону Лебеда, согласно каталогу Fermi-LAT.

При анализе всего временного диапазона, количество фотоноподобных событий из области Кокон Лебеда согласуется с ожидаемым фоном. Поэтому были установлены ограничения на поток гамма-излучения с энергиями более 300 ТэВ, на уровне достоверности 95%: $I_\gamma(E_\gamma > 300 \text{ ТэВ}) < 2.6 \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако если проанализировать количество событий из той же области, но относительно времени прихода нейтринного события IceCube-201120A, то можно обнаружить положительный сигнал, как это было показано в сообщении ATel#: 14255 [96].

Для обнаружения сигнала от исследуемой области проводился следующий анализ. Общее число событий наблюдаемых из области Кокон Лебеда обозначим как N . Так как величина временного окна, в котором будет происходить поиск, нам неизвестен и является свободным параметром, характеризующим про-

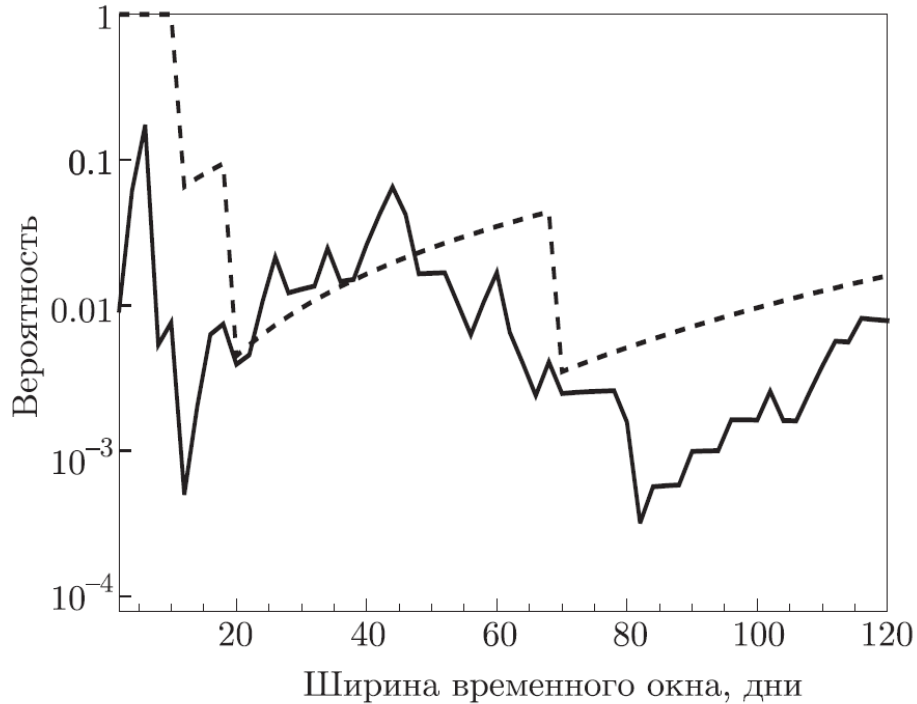


Рисунок 3.7 — Зависимость вероятности (p -value) от ширины окна с центром, отсчитанным относительно времени прихода нейтрино. Сплошная линия соответствует всем событиям, штриховая — фотонным кандидатам.

должительность потенциальной вспышки. Обозначим данный параметр через d , значение $d/2$ которого будем варьировать от 1 до 60 дней с шагом 1 день, относительно времени прихода нейтринного события, с целью оценить значимость для каждой итерации. На основе числа событий $M(d)$, попавших в выбранный временной интервал, вычислялось значение $p(d)$, которое показывало вероятность получить данное или бóльшее количество событий, за выбранный промежуток времени из области Кокона Лебеда, при некотором ожидаемом фоне. После чего находилось предварительное значение p -value: $p_{pre} = \min_d p(d)$. Дополнительно выполнялась оценка возможных статистических флуктуаций, которая выполнялась на основе Монте–Карло моделирования, путем случайного распределения времен прихода N событий, i раз. Для каждого смоделированного набора из N событий, выполнялось варьирование временного окна и нахождение параметров $p_i(d)$ и p_i -value. Доля испытаний с $p_i(d) \leq p_{pre}$, будет определять вероятность p наблюдаемого эффекта, с учетом возможных статистических флуктуаций.

Полное число событий N , зарегистрированных за 829 дней из области Кокона Лебеда, равнялось 346, причем 5 из них соответствовали фотонным кандидатам. Вероятность как функция от ширины временного окна $p(d)$ показана на рисунке 3.7, для двух типов данных: всех 346 событий и 5 фотоноподобных событий соответственно.

Значение вероятности для всех отобранных событий соответствовало $p_{pre} = 2.4 \times 10^{-4}$ и достигалось при параметре $d = 82$ дня. Полученное значение p_{pre} будет соответствовать достоверности 3.67σ , до учета статистических флуктуаций, для потенциальной вспышке в области Кокона Лебеда с продолжительностью около 82 дня. Введение статистической поправки дает значение вероятности $p = 1.5 \times 10^{-3}$, соответствующее достоверности 3.17σ . Вероятность для отобранных фотоноподобных событий $p_{pre} = 5.5 \times 10^{-3}$, при величине $d = 70$ дней, соответствующие достоверности 2.78σ ; после поправки вероятность $p = 1.1 \times 10^{-2}$ и 2.55σ соответственно. На рисунке 3.8 показано распределение всех (346) событий событий во временном окне шириной 82 дня, а также указаны времена прихода фотонных кандидатов (вертикальные стрелки) и момент прихода нейтринного событий IceCube–201120A (вертикальная пунктирная линия).

В предположении вспышки был получен поток и флюенс гамма-излучения с энергией более 300 ТэВ от исследуемой области Кокона Лебеда:

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

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

В предположении нейтринной вспышки, был оценен флюенс, который составил примерно $3.5 \text{ ГэВ} \cdot \text{см}^{-2}$. Можно отметить, что полученное значение согласуется по порядку величины со значением для гамма-излучения сверхвысоких энергий. Полученные значения для потока и флюенса, в сравнении с другими установками, показаны на рисунке 3.9.

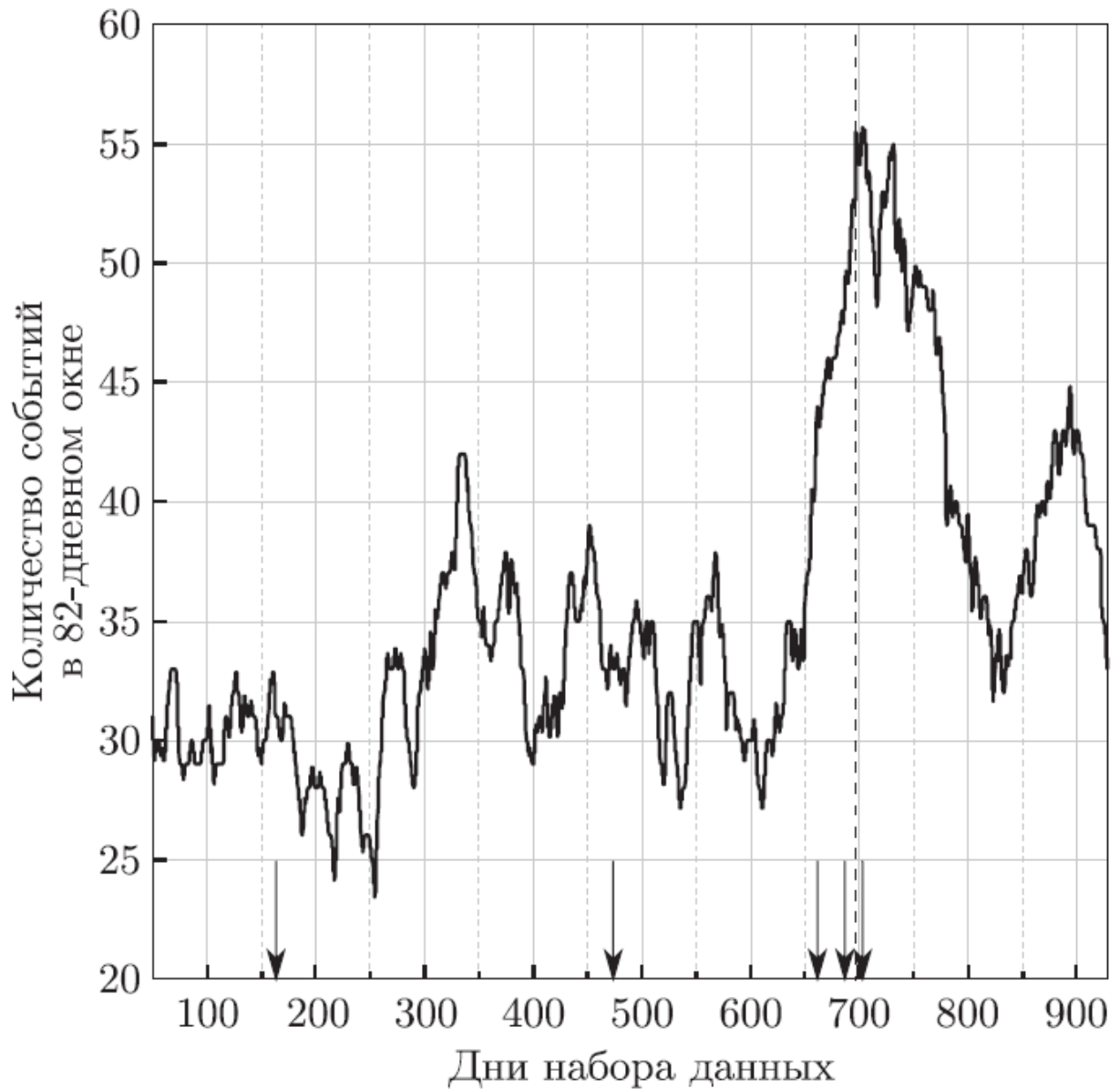


Рисунок 3.8 — Распределение всех событий во временном интервале шириной 82 дня. Стрелками показаны дни прихода фотонных кандидатов. Вертикальная пунктирная линия соответствует времени прихода нейтрино, 20 ноября 2020 г.

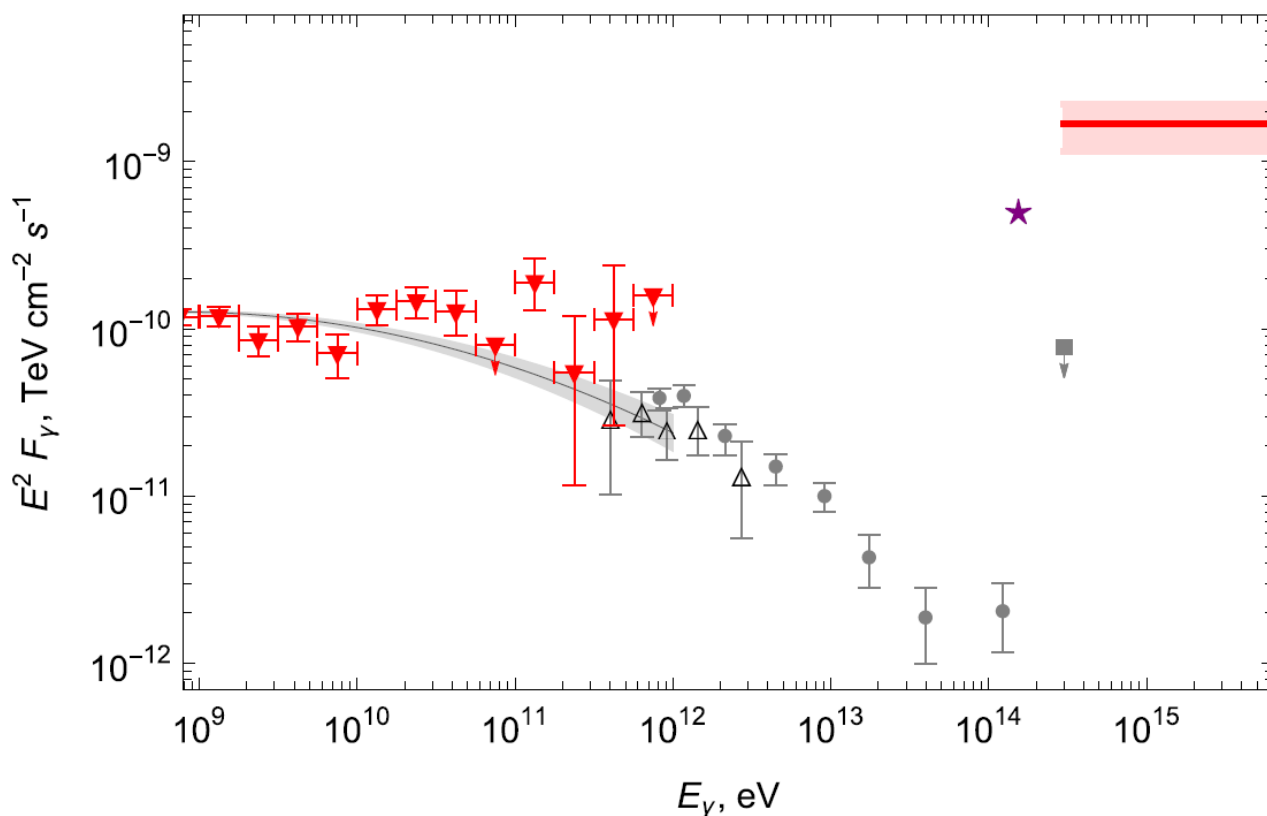


Рисунок 3.9 — Спектральное распределение энергии для Кокона Лебедя с энергией выше 1 ГэВ. Серый цвет (усредненные по времени значения): линия – поток по данным Fermi–LAT [91]; полый треугольник – данные эксперимента ARGO [97], круги – данные эксперимента HAWC [62]; квадрат – данные полученные в текущем анализе. Красный цвет (значения в предположении вспышки): треугольники – получены, участником группы «Ковер-3» – Егором Подлесным, на основе публичных данных Fermi–LAT; линия – данные полученные в текущем анализе. Фиолетовая звезда – оценка флюенса нейтринного события IceCube–201120A.

Данный результат является первым свидетельством совместной, практически одновременной, регистрации гамма-излучения сверхвысоких энергий и нейтринного события IceCube-201120A, который был опубликован в работах [17, 18, 19, 15]. Интересно заметить, что в момент подготовки работы к публикации вышла в печать работа коллаборации LHAASO [8], в которой сообщалось о наблюдении 12 источников гамма-излучения сверхвысоких энергий, среди которых был Кокон Лебеда.

Важные, для рассматриваемой работы, результаты были получены под руководством Быкова Андрея Михайловича, в которых моделировались спектры излучения и распространения гамма-излучения сверхвысоких энергий от источников: Кокон Лебеда [98] и PSR J2032+4127/MT91 213 [99]. В результате было установлено, что потоки, зарегистрированные установкой «Ковер-2», не могут быть объяснены в предположении вспышки в источнике Кокон Лебеда. Однако если предположить в качестве потенциального источника – PSR J2032+4127/MT91 213, то потоки могут быть объяснены, в основном, за счет фотон-адронных взаимодействий возникающих в гамма двойной системе. Данный результат является хорошим косвенным подтверждением наблюдений выполненных на установке «Ковер-2» и уверенным доказательством того, что новая установка «Ковер-3», несмотря на малые ее размеры (относительно ведущих установок), может быть очень полезна для современной астрофизики.

4. Ливневая установка нового поколения «Ковер–3»

Последующая модернизация установки «Ковер–2» [100, 101] предполагала расширение наземной части установки путем добавления новых выносных пунктов регистрации (ВПП), увеличения числа счетчиков мюонного детектора (МД), и создания новой системы сбора данных.

С момента первых публикаций о модернизации установки прошло достаточно много времени и изначальные планы о расширении установки несколько раз менялись из-за различных факторов. Ниже описано текущее состояние установки «Ковер–3» и планы дальнейшего развития.

4.1 Наземная часть установки

Расширение наземной части установки осуществлялось путем увеличения количества ВПП, которые сосредоточены преимущественно вокруг и над подземным МД. Актуальная схема расположения ВПП установки показана на рисунке 4.1, а их несимметричное расположение связано с особенностями рельефа.

Новые выносные пункты регистрации отличаются от тех, которые были использованы в установке «Ковер–2». Был сделан выбор в пользу счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, которые были описаны в главе 2.2.1. Для сборки новых счетчиков использовался сцинтиллятор марки СЦ–201 [102, 103], который изготавливался по заказу БНО в Институте высоких энергий, Протвино [104].

Новые ВПП состоят 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, сделан-

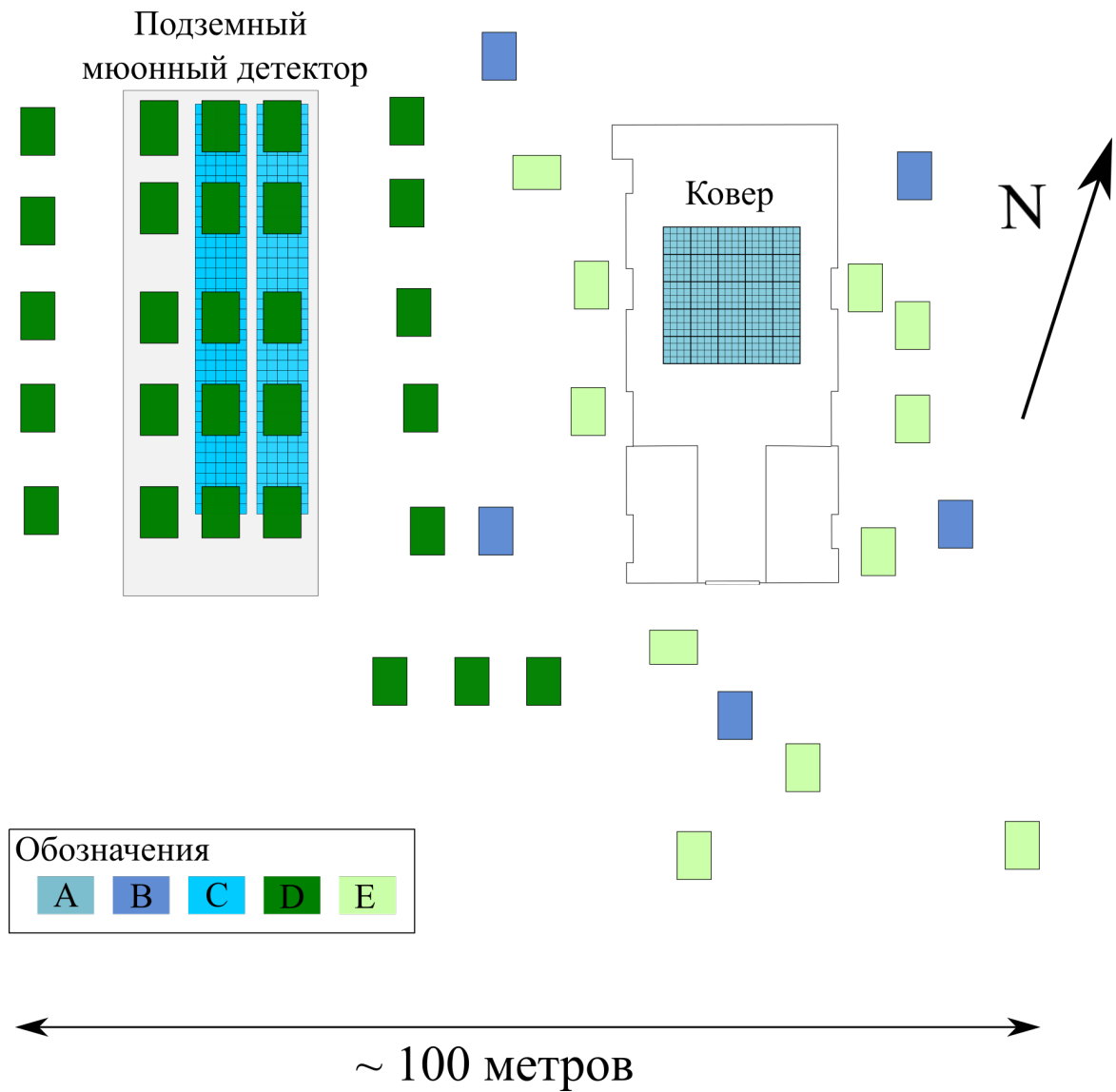


Рисунок 4.1 — Схема установки «Ковер-3». Условные обозначения: (А) установка «Ковер», 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора; (В) старые выносные пункты на основе жидкого сцинтиллятора; (С) подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластикового сцинтиллятора; новые выносные пункты регистрации на основе пластикового сцинтиллятора (D)–готовые к работе, (E)–в стадии укомплектации.

Помещение ВП

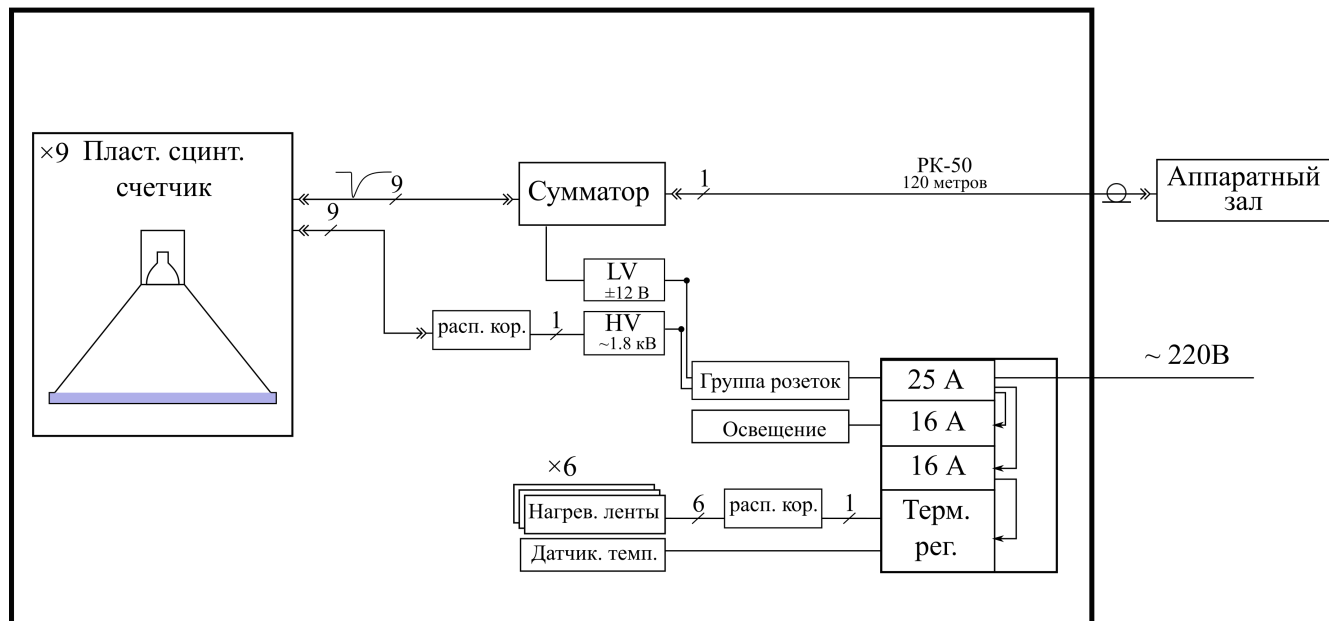


Рисунок 4.2 — Схема нового выносного пункта регистрации установки «Ковер-3», описание в тексте.

ных из сэндвич-панелей толщиной 5 сантиметров. Блок схема новых ВПР показана на рисунке 4.2.

Питание ФЭУ всех счетчиков осуществляется с помощью общего прецизионного программируемого высоковольтного источника Мантигора НТ-2000N [105]. Напряжение 1750 вольт с источника подается на распределительную коробку, с которой напряжение по кабелю РК-75 длиной 8 метров подается на каждый счетчик. Также делитель напряжения каждого счетчика ФЭУ оборудован потенциометром, установленным между 2 и 3 диодами ФЭУ, позволяющем выполнять настройку коэффициентов усиления (КУ) ФЭУ выносных пунктов регистрации.

Настройка КУ ФЭУ необходима для того, чтобы для всех счетчиков ВПР, при одинаковом энерговыделении, на анодном выходе ФЭУ формировался импульс одинаковой амплитуды и заряда. При помощи анализатора спектра регистрировался энергетический спектр одиночных мюонов всех счетчиков ВПР. После чего, регулируя потенциометр, подбирались такие КУ ФЭУ, чтобы наибо-

лее вероятное энерговыделение от прохождения вертикального мюона для всех счетчиков соответствовало одному каналу анализатора спектра.

Анодные сигналы с каждого счетчика по кабелю РК–50 длиной 8 метров поступают на входы активного сумматора, на двух выходах которого разветвляется суммарный импульс, один из которых по кабелю РК–50 длиной 120 метров поступает в аппаратный зал для измерения энерговыделения и фиксации времени прихода события.

Планируемое изначально количество ВПР установки «Ковер–3» изменялось несколько раз из-за появления дополнительных источников финансирования. Поэтому количество выполняемых сотрудниками установки работ по ее модернизации тоже значительно возросло. В итоге, на начало лета 2022 года, согласно рисунку 4.1, полностью оборудовано 28 новых ВПР, большая часть из них прошла этап настройки коэффициентов усиления ФЭУ. Для еще 11 ВПР собраны помещения и подведено электричество, сборка счетчиков, настройка и ввод в эксплуатацию ожидается в течение нескольких лет.

4.2 Мюонный детектор большой площади

Как указывалось выше, мюонный детектор установки «Ковер–2» состоял из 175 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, описанных в главе 2.2.1, расположенных в среднем туннеле МД. В рамках модернизации МД было собрано 235 новых счетчиков на основе пластического сцинтиллятора, 35 из них были установлены в средний туннель МД, а оставшиеся 205 были установлены в первом туннеле. Таким образом, были полностью укомплектованы два туннеля МД, рисунок 4.1, что соответствует общей эффективной площади 410 м².

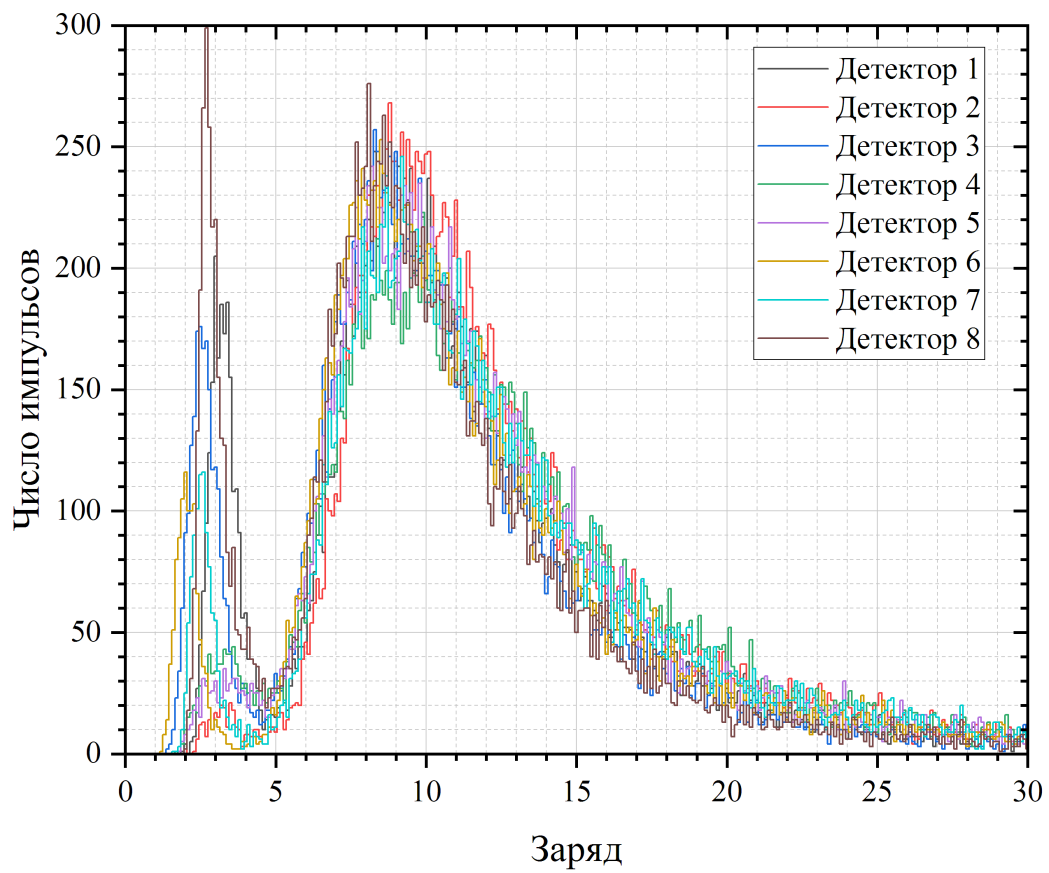


Рисунок 4.3 — Спектры энергоснабжения с восьми произвольных счетчиков МД после настройки коэффициентов усиления ФЭУ.

В новых счетчиках МД светосбор осуществлялся с помощью фотоумножителей ФЭУ–173, имеющих сходные с ФЭУ–49Б характеристики. Настройка коэффициентов усиления ФЭУ выполнялась также, как и для ВПР, с помощью потенциометра, установленного между 3 и 4 диодами ФЭУ. На рисунке 4.3 показаны спектры энерговыделения нескольких счетчиков, прошедших настройку КУ ФЭУ. Измерение спектров производилось при помощи программируемого осциллографа LeCroy WaveSurfer 44Xs–A. Для которого была специально разработана программа на языке Pascal для измерения спектров энерговыделения и амплитуд.

Каждый новый счетчик имеет собственный комплект электроники, установленный внутри кожуха ФЭУ. Комплект включает временной дискриминатор (ВД) с плавающим порогом и цифровой логарифмический число–импульсный преобразователь, собственной разработки.

ВД с плавающим порогом используется для фиксации момента времени, когда в счетчике было зарегистрировано событие. В наземных установках эти временные задержки используются для восстановления направления прихода события. Однако использование таких устройств в МД позволяет не только определить количество сработавших счетчиков, но и эффективно исключать из расчетов те счетчики, время срабатывания которых не соответствует времени прихода основного события, смотри рисунок 4.4. На вход каждого ВД подается сигнал с анода ФЭУ, который преобразуется в цифровой сигнал стандарта NIM. После чего сигнал по кабелю РК–50 поступает на систему сбора данных мюонного детектора.

Изначально для измерения энерговыделения предполагалось использовать цифровые логарифмические число–импульсные преобразователи. Это устройства, преобразующие анодный сигнал ФЭУ в последовательность логических импульсов, где количество импульсов пропорционально логарифму энерговыделения в счетчике. Однако из–за того, что данная разработка устарела, и ее внедрение в систему сбора данных МД связано со значительными сложностями

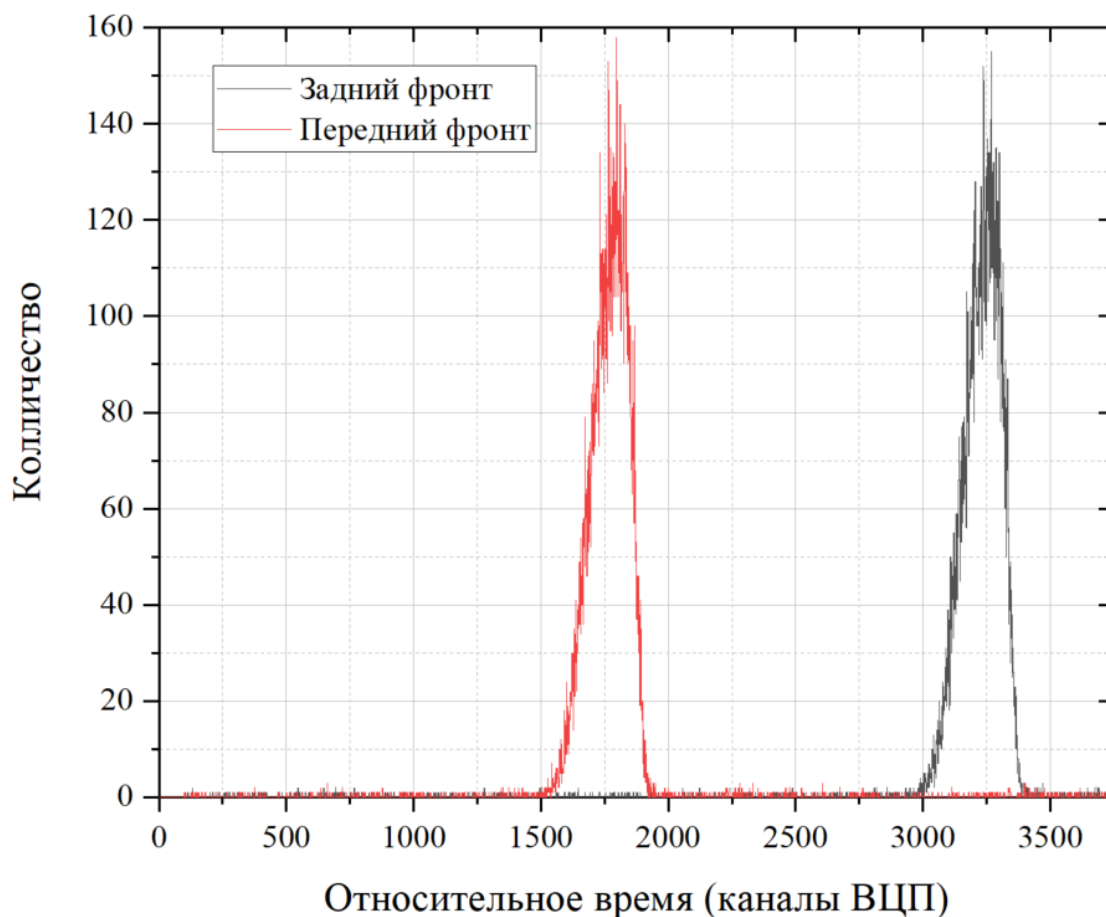


Рисунок 4.4 — Пример суточного распределения относительных временных задержек переднего и заднего фронта импульса, генерируемого ВД с плавающим порогом сцинтилляционного счетчика МД. Помимо основных распределений можно заметить фоновые (случайные) срабатывания ВД счетчика. Методика точного измерения времени срабатывания каждого счетчика позволяет исключать фоновые события, вызванные прохождением одиночных мюонов, что позволит повысить эффективность регистрации ливней, вызванных первичными фотонами.

ми, ранее не предусмотренными, поэтому от их использования было решено отказаться в пользу аналого–цифровых преобразователей (АЦП) фирмы CAEN, модель V2745 [106]. Две платы этих АЦП были куплены в конце 2021 года и находится на этапе разработки системы сбора данных на их основе.

4.3 Система сбора данных

По аналогии с установкой «Ковер–2», система сбора данных установки «Ковер–3» разделена на две части, каждая из которых отвечает за сбор, обработку и хранение данных наземной части установки и подземного мюонного детектора. Ниже будет описана каждая из этих систем.

4.3.1 Система сбора данных наземной части установки

Для восстановления параметров ШАЛ нам необходимо измерять относительные временные задержки и энерговыделение для каждого ВПР. Поэтому анодные сигналы с выхода сумматора каждого ВПР поступают в аппаратный зал на вход разветвителей анодных сигналов. Разветвитель представляет собой устройство, на вход которого поступают анодные сигналы, а на его выходах дублируются входные сигналы, причем сигналы на выходах имеют такую же амплитуду, что и на входе. Использование разветвителя необходимо для возможности одновременно подавать сигнал с одного ВПР на систему измерения временных задержек и аналого–цифровые преобразователи, а также иметь возможность производить различные измерения, например, контроль коэффициентов усиления ФЭУ ВПР, со свободных выходов разветвителя.



Рисунок 4.5 — Фотография крейта VME8100/00 и электроники, входящих в состав системы сбора данных наземной части установки «Ковер-3». Обозначения: (A) – Крейт-контроллер V2718; (B, C) – аналого-цифровой преобразователь V1742; (D) – время-цифровой преобразователь V1190B; (E) – логический блок V2495; (F–I) – временные дискриминаторы с плавающим порогом V812.

В качестве основы для системы сбора данных используется крейт стандарта VME, фирмы CAEN, модель VME8100/00 [107], в который устанавливаются остальные платы для обработки сигналов с ВПР. Коммуникация с онлайн компьютером осуществляется через оптоволоконную линию, для чего в него, на PCI шину, устанавливается адаптер, модель V2818 [108], а в крейт устанавливается VME-PCI крейт-контроллер, модель V2718 (к настоящему вышла из производства). Также для выработки управляющего сигнала и его точной временной привязки был приобретен программируемый логический блок V2495 [109]. Однако, разработка встроенного программного обеспечения (прошивки) находится в процессе разработки. Фотография системы сбора наземной части показана на рисунке 4.5.

Система измерения временных задержек

Анодный сигнал с одного из выходов разветвителя попадает на систему измерения временных задержек, которая состоит из временного дискриминатора (ВД) с плавающим порогом и время-цифрового преобразователя (ВЦП), которые установлены в общий крейт.

Как отмечалось ранее, временные дискриминаторы с плавающим порогом позволяют производить временную привязку с высокой точностью и в широком диапазоне амплитуд. В крейте установлено четыре платы ВД фирмы CAEN, модель V812 [110]. Каждая плата имеет 16 аналоговых входов и рассчитана на работу с анодными сигналами отрицательной полярности, в диапазоне амплитуд от -5 мВ до -5 В. Для каждого входа независимо генерируется логический импульс стандарта ECL переменной длительности в диапазоне от 12 нс до 206 нс, которая настраивается через пользовательскую онлайн программу и интерфейс VME. Причем передний фронт этого импульса имеет привязку

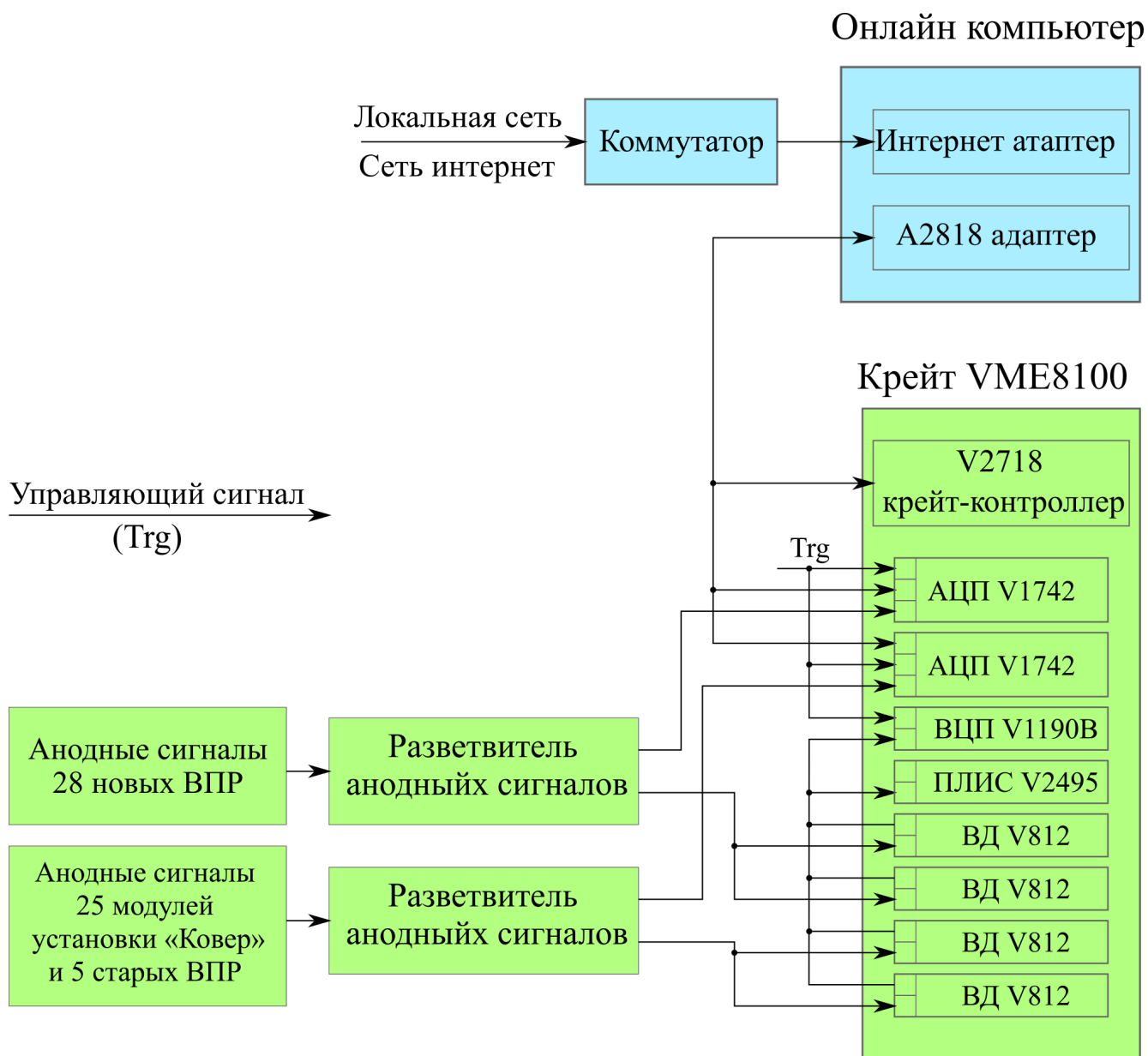


Рисунок 4.6 — Блок схема системы сбора данных наземной части установки «Ковер-3», описание в тексте.

к переднему фронту входного аналогового сигнала при достижении им порога срабатывания ВД. Для данной модели порог срабатывания устанавливается на 20% от максимальной амплитуды входного сигнала. Неопределенность временной привязки выходного импульса оценивается как ± 400 пс, для сигналов в диапазоне амплитуд от -50 мВ до -5 В и временем нарастания переднего фронта около 25 нс. Также через интерфейс VME производится настройка минимального порога срабатывания ВД, который задается в диапазоне от -1 мВ до -255 мВ и шагом 1 мВ.

После формирования сигналы ECL с каждого канала дублируются и поступают на два 2.54 мм 16-контактных разъема, расположенных на плате, с выходов которых, с помощью переходников [111] и [112], сигналы поступают на время-цифровой преобразователь (ВЦП). Он производит измерения временных задержек между управляющим сигналом (СТАРТ), открывающим измерительное окно, и сигналами, приходящими с временных дискриминаторов (СТОП).

В системе сбора данных используется ВЦП фирмы CAEN, модель VX1190B [113]. Данная модель обладает 64 измерительными каналами, по общему количеству каналов ВД. На данный момент в качестве управляющего сигнала используется мастер, описанный в главе 2.1.2. Поступая на плату он открывает измерительное окно шириной около 500 нс, которое настраивается онлайн программой с шагом 25 нс. Принцип работы ВЦП проиллюстрирован на рисунке 4.7

Измерение времени относительно начала временного окна производится для переднего и заднего фронтов ($t_{n.1}$ и $t_{n.2}$ на рис. 4.7) сигналов поступающих с ВД. Данная методика позволяет не только получить временные задержки для восстановления направления прихода ливня, но и производить контроль качества работы ВД. Так как длительность импульса формируемого ВД сигнала настраивается пользователем, то измеряя длительность импульса с помощью ВЦП можно отслеживать ошибки в работе ВД. Плата ВЦП позволяет измерять

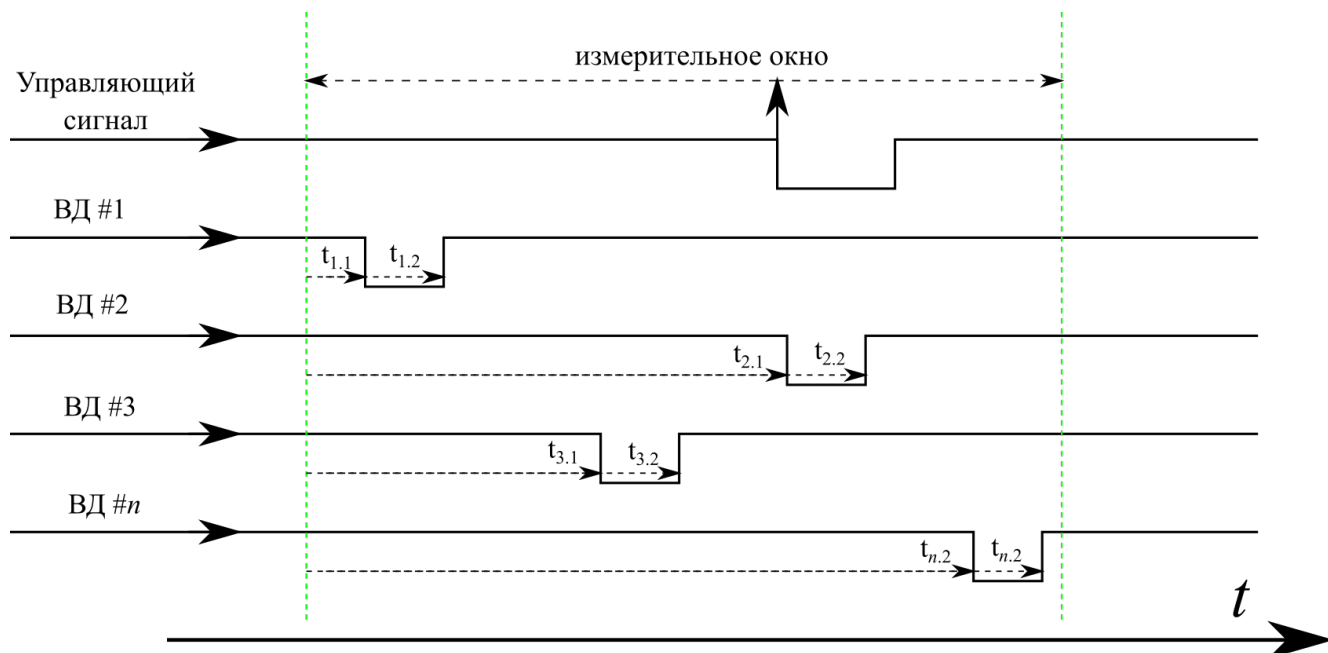


Рисунок 4.7 — Принцип работы системы измерения временных задержек время-цифровым преобразователем, описание в тексте.

время с тремя настраиваемыми разрешениями 100, 200 и 800 пс; на данный момент в работе используется разрешение 800 пс.

Также ВЦП оборудована собственной внутренней памятью 32 тыс.×32 бит, в которую записывается информация о событии. Каждый новый управляющий сигнал создает в памяти устройства событие, которому система присваивает номер (EventID). Когда в измерительное окно попадают сигналы с ВД система сохраняет в память ВЦП информацию о сработавшем канале и временных задержках для переднего и заднего фронта. Если в измерительное окно не попало ни одного сигнала, в буфере памяти будет создано событие с нулевым количеством сработавших каналов. Информация из внутренней памяти ВЦП считывается онлайн программой по шине VME и через крейт-контроллер передается на онлайн компьютер.

Система измерения энерговыделения

Для измерения энерговыделения изначально планировалось использовать зарядо–цифровые преобразователи (ЗЦП), фирмы SAEN, модель [114]. Однако первоначальные измерения, полученные с помощью ЗЦП, показали, что их использование нецелесообразно по причине низкой помехоустойчивости и небольшого измерительного диапазона энерговыделения. Поэтому, после появления дополнительного источника финансирования, было принято решение отказаться от использования ЗЦП в пользу программируемых аналого–цифровых преобразователей (АЦП) фирмы, SAEN, модель V1742 [115]. С их помощью можно регистрировать формы импульсов анодных сигналов ВПР и вычислять площадь под импульсом, соответствующей заряду, которая в свою очередь будет пропорциональна энерговыделению.

В кейте установлено две платы АЦП, каждая из которых имеет 32 стандартных измерительных канала, на которые подаются анодные сигналы с ВПР, а также 2 дополнительных канала с возможностью использовать их для выработки внутреннего управляющего сигнала. Измерительные каналы имеют динамический диапазон 1 вольт и разрешение 12 бит, что соответствует измерению амплитуды импульса с шагом 0.244 мВ. Частота дискретизации АЦП задается программно для всех каналов и может равняться 5, 2.5, 1 и 0.75 ГВыб/с. В работе используется параметр 1 ГВыб/с, который соответствует интервалу времени между двумя оцифрованными значениям амплитуды 1 нс.

Оцифровка импульсов происходит при поступлении управляющего сигнала на вход платы АЦП, импульс открывает настраиваемое измерительное окно, шириной 1024 Выб, которое может быть программно уменьшено. Длительность измерительного окна определяется исходя из его ширины и частоты дискретизации. Для каждого измерительного канала, пока открыто измерительное окно, оцифровываются значения амплитуд с выбранной частоты дискретизации.

По результатам работы полученные формы импульсов анодных сигналов ВПР записываются во внутреннюю память АЦП, рассчитанную на 128 событий. В случае отсутствия сигнала с ВПР оцифровывается и записывается в память устройства шум на входе канала АЦП. Передача данных с внутренней памяти АЦП может осуществляться не только по шине VME, но и через собственный оптоволоконный канал, установленный на каждой плате. Приоритетным считается последний способ подключения, так как он позволяет передавать данные напрямую в компьютер, минуя передачу данных по шине VME, что в несколько раз уменьшает время их передачи.

Онлайн программа

Для описанного выше оборудования была разработана онлайн программа, осуществляющая настройку, контроль работы и считывание данных из внутренней памяти ВЦП и АЦП. Разработка велась на языке Си, на основе стандартных библиотек, разработанных фирмой CAEN для своих устройств.

Структура файлов онлайн программы показана на рисунке 4.8. Основной файл main.c производит управление всеми элементами программы и системы сбора данных. В начале происходит инициализация крейт контроллера, после чего последовательно вызываются функции, реализованные в файлах: ConfigV812.c, ConfigV1190.c, ConfigV1742.c, каждая из которых отвечает за настройку всех параметров ВД V812, ВЦП V1190 и АЦП V1742 соответственно. В случае успешного выполнения всех функций, программа переходит к инициализации режима сбора данных, в противном случае работа программы завершится с ошибкой.

После настройки все устройства переходят в штатный режим работы. Как было сказано выше, управляющий сигнал, поступающий на входы ВЦП и АЦП,

```
..\
├── main.c
├── main.h
├── comp.sh
├── include
│   └── V1190.h
└── src
    ├── BuffProcV1190.c
    ├── BuffProcV1742.c
    ├── CheckDataFile.c
    ├── ClearTempBuff.c
    ├── ConfigV812.c
    ├── ConfigV1190.c
    ├── ConfigV1742.c
    ├── RWReg.c
    ├── TimeStamp.c
    ├── WriteData.c
    └── WriteToLogFile.c
```

Рисунок 4.8 — Древо каталогов и файлов онлайн программы, описание в тексте.

```

Файл  Правка  Вид  Терминал  Вкладки  Справка
[16.05.2022 11:36:25.001]
Readout Cycle #8357 Init
Readout Cycle #8357 Success
  Events stored in TDC buffer 7
  Events stored in ADC#0 buffer 7
  Events stored in ADC#1 buffer 7
TDC Buff Proc
Event ID: 60325; Act.Ch:  0  1  2  3  4
Event ID: 60326; Act.Ch:  0  1  2  3  4
Event ID: 60327; Act.Ch:  0  4  2  3  1
Event ID: 60328; Act.Ch:  0  1  2  3  4
Event ID: 60329; Act.Ch:  0  4  1  2  3
Event ID: 60330; Act.Ch:  0  3  4  1  2  1
Event ID: 60331; Act.Ch:  0  4  3  1  2
ADC Buff Proc
ADC#0;
  EvId: 60316;
  EvId: 60317;
  EvId: 60318;
  EvId: 60319;
  EvId: 60320;
  EvId: 60321;
  EvId: 60322;
ADC#1;
  EvId: 60316; 39 40 41 42 43 44 45 46 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63
  EvId: 60317; 39 41 42 43 44 45 46 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 61 62 63
  EvId: 60318; 39 40 41 42 43 44 45 46 48 49 50 51 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63
  EvId: 60319; 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63
  EvId: 60320; 39 40 41 42 43 44 45 46 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63
  EvId: 60321; 39 40 41 42 43 45 46 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 61 62 63
  EvId: 60322; 39 40 41 42 43 44 45 46 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63
Writing data to file

```

Рисунок 4.9 — Изображение с экрана онлайн компьютера демонстрирующее пример работы онлайн программы, на котором показан результат операции считывания, предобработки и записи данных в файл. Конфигурация системы сбора данных дублирует работу установки «Ковер-2».

дает команду к оцифровке сигналов, поступающих на измерительные каналы устройств, а оцифрованная информация хранится в памяти устройств. Данные о событиях накапливаются в памяти ВЦП и АЦП, пока онлайн программа не выполнит их чтение, которое определяется пользователем и , на настоящее время, выполняется раз в 5 секунд.

Считанная информация хранится в оперативной памяти компьютера, после чего она передается в функции: BuffProcV1190.c и BuffProcV1742.c, отвечающие за предварительную обработку данных с ВЦП и АЦП соответственно. В процессе работы этих функций данные сортируются и сохраняются в общий промежуточный буфер, а общая информация о считанных данных выводится на экран, рисунок 4.9.

Перед тем, как сохранить данные в файл, вызывается функция CheckDataFile.c, которая выполняет проверку существования необходимых каталогов (год и сутки), а также наличие бинарных файлов для записи в них

информации. Информация записывается в бинарный файл в течение 15 минут, после чего создается новый. После выполнения проверки вызывается функция `WriteData.c`, которая сохраняет данные из промежуточного буфера в файл. Важно отметить, что на данный момент для сохранения данных с ВЦП и двух плат АЦП создаются отдельные бинарные файлы, как это показано на рисунке 4.11. Данный подход является временной мерой и необходим для поиска неисправностей, вызванных программной частью и разработки алгоритмов согласования событий между устройствами. Впоследствии, когда эти работы будут выполнены, данные будут записываться в один файл.

Также для работы онлайн программы были разработаны и другие функции, вспомогательные, необходимые для работы остальных элементов программы. Функция `ClearTempBuff.c` выполняет очистку временного буфера, после того как данные были успешно записаны в файл. В файле `RWReg.c` реализовано несколько функций, которые позволяют считывать информацию из отдельных регистров памяти устройств. Функция `TimeStamp.c` считывает системное время и хранит его в виде структуры в оперативной памяти, в удобном для работы формате. Функция `WriteToLogFile.c` используется в программе для записи информации о результате выполнения той или иной операции, после чего делается запись в текстовый файл, например `Y2022D136_Log.txt`, на рисунке 4.11. Это реализовано в качестве дополнительного контроля за работой онлайн программы и оборудования, с ее помощью можно проверить, какие устройства были корректно инициализированы и настроены, с каких регистров не удастся считать информацию, и так далее.

На данный момент онлайн программа находится в режиме набора данных с 13 апреля 2022 года, который дублирует работу установки «Ковер–2». На временные дискриминаторы подаются сигналы от четырех старых ВПР и на вторую плату АЦП подаются анодные сигналы с 25 модулей центрального детектора. Данный набор данных необходим для возможности сравнения

результатов, полученных двумя независимыми системами сбора данных, и последующей оценки качества работы новой системы сбора информации.

4.3.2 Система сбора данных мюонного детектора

Как представлено выше, мюонный детектор состоит из 235 новых счетчиков на основе пластического сцинтиллятора и 175 старых. Система сбора данных МД имеет схожее исполнение с системой для наземной части и состоит из обычного крейта VME, оснащаемого крейт-контроллером V2718 для коммуникации с компьютером через оптоволоконный канал и четырьмя платами ВЦП.

Сигналы стандарта NIM с 235 временных дискриминаторов новых счетчиков поступают на транслятор уровней NIM→LVDS, после чего сигналы по стандартным, 16-канальным шлейфам поступают на адаптеры [112] и, в дальнейшем, на две 128-канальные платы ВЦП фирмы CAEN, модель V1190A [116]. По остальным характеристикам данная модель аналогична той, что используется в системе сбора наземной части, которая описывалась в главе 4.3.1.

Сигналы стандарта TTL со 175 РС преобразователей сцинтилляционных счетчиков установки «Ковер-2» сначала поступают на разветвитель логических сигналов TTL→2×TTL. С разветвителя одна партия сигналов идет на систему сбора данных установки «Ковер-2», а вторая – на транслятор уровней TTL→LVDS и две платы вышеупомянутых ВЦП V1190A.

Управляющий сигнал стандарта NIM из аппаратного зала установки поступает в мюонный детектор по кабелю РК-50 длиной около 80 метров, после чего подается на разветвитель-транслятор логических сигналов NIM→2×NIM+2×TTL. Один сигнал стандарта NIM последовательно подключается к четырем платам ВЦП и открывает измерительное окно. Еще один

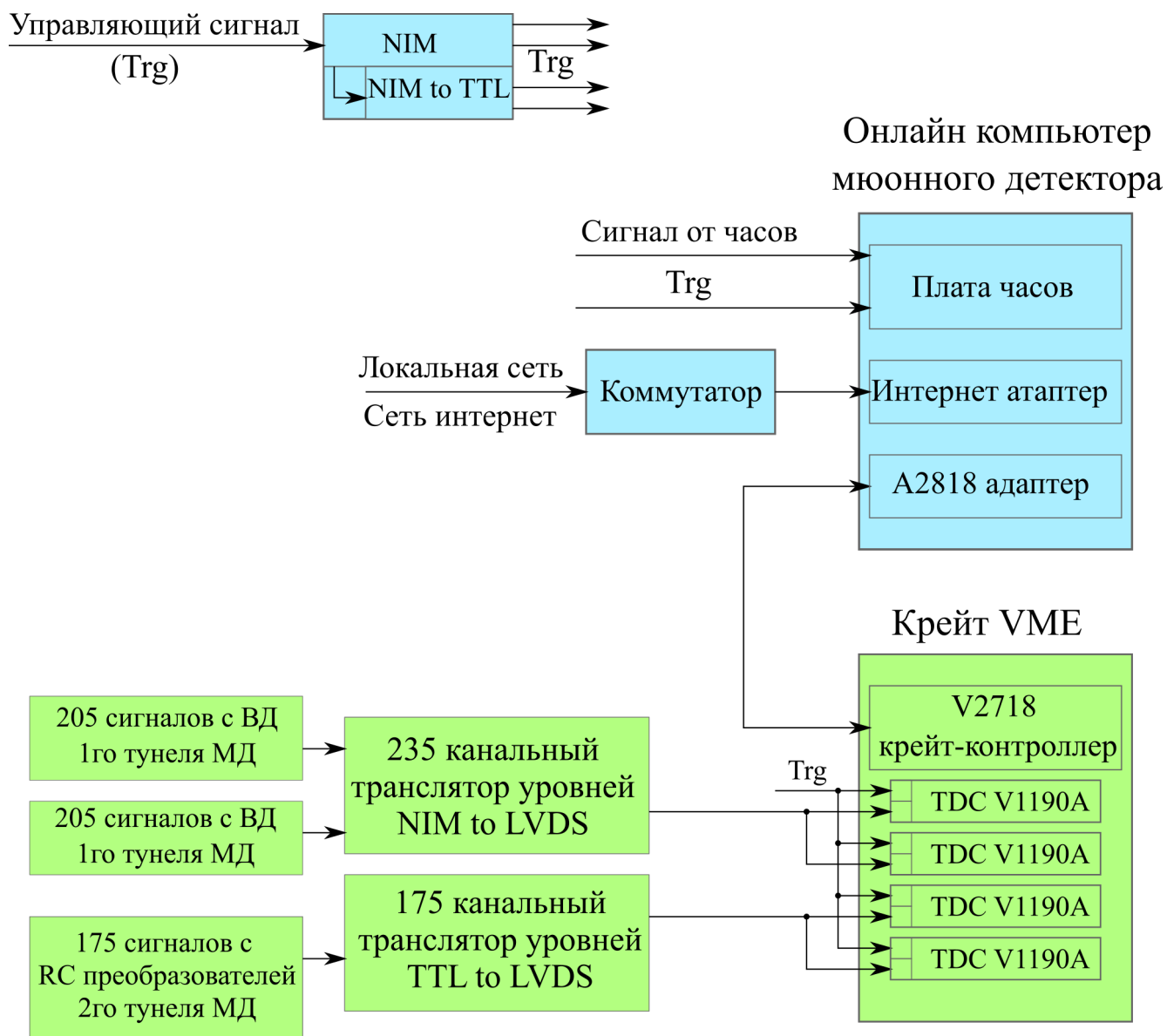


Рисунок 4.10 — Блок схема системы сбора данных мюонного детектора установки «Ковер-3», описание в тексте.

сигнал стандарта TTL подается на плату часов, установленную в компьютере на ISA шину. Данная плата используется для временной привязки событий, с точностью ± 1 миллисекунда, по часам установки «Ковер-2».

Управляющий сигнал, поступая на ВЦП, открывает измерительное окно, длительность которого отличается для двух типов сигналов. Для сигналов с 235 новых счетчиков оно равно 1 мксек., а для сигналов с 175 РС преобразователей она максимальна и составляет 104 мксек. Большая длительность объясняется тем, что сигналы с РС преобразователей имеют переменную длительность, как было показано в главе 2.2.1, где длительность пропорциональна логарифму энерговыделения в детекторе, а передний фронт не имеет временной привязки. Для каждого сигнала, попавшего в измерительное окно, записывается временная задержка для переднего и заднего фронта, относительно начала измерительного окна.

Таким образом, для 235 счетчиков регистрируется факт срабатывания счетчика с порогом 0.5 р.ч. и определяется время его срабатывания с наносекундной точностью. А для 175 счетчиков регистрируется факт его срабатывания с порогом 0.5 р.ч. без точной временной привязки и измеряется энерговыделение в счетчике. Несмотря на то, что данная конфигурация системы сбора мюонного детектора соединяет в себе различные электронные устройства, получаемых данных достаточно для решения задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Так как основной задачей будет являться поиск безмюонных и маломюонных событий, для которых число сработавших счетчиков либо равно нулю, либо не превышает некоторое число, где оно будет зависеть от критериев отбора фотоноподобных событий.

Так как модернизация мюонного детектора уже проводилась ранее, разработка онлайн программы для системы сбора данных мюонного детектора выполнялась одним из сотрудников ЛПСТ БНО и была запущена в режиме набора экспериментальных данных в июне 2019 года. Однако принцип ее работы аналогичен описанному выше, в главе 4.3.1, за одним лишь исключением. Счи-

тывание из внутренней памяти ВЦП происходит не раз в 5 секунд, а команда на считывание отдается платой часов, которая генерирует системное прерывание, когда на ее вход поступает управляющий сигнал, и прерывание инициализирует считывание информации с последующей записью данных в файл. Таким образом, информация считывается сразу после ее появления во внутренней памяти ВЦП.

Данные записываются в бинарные файлы, причем длительность записи данных в файл соответствует 15 минутам. Таким образом за сутки программа создает 96 файлов с экспериментальными данными, которые хранятся на онлайн компьютере. На рисунке 4.11 справа показано древо каталогов и файлов экспериментальных данных.

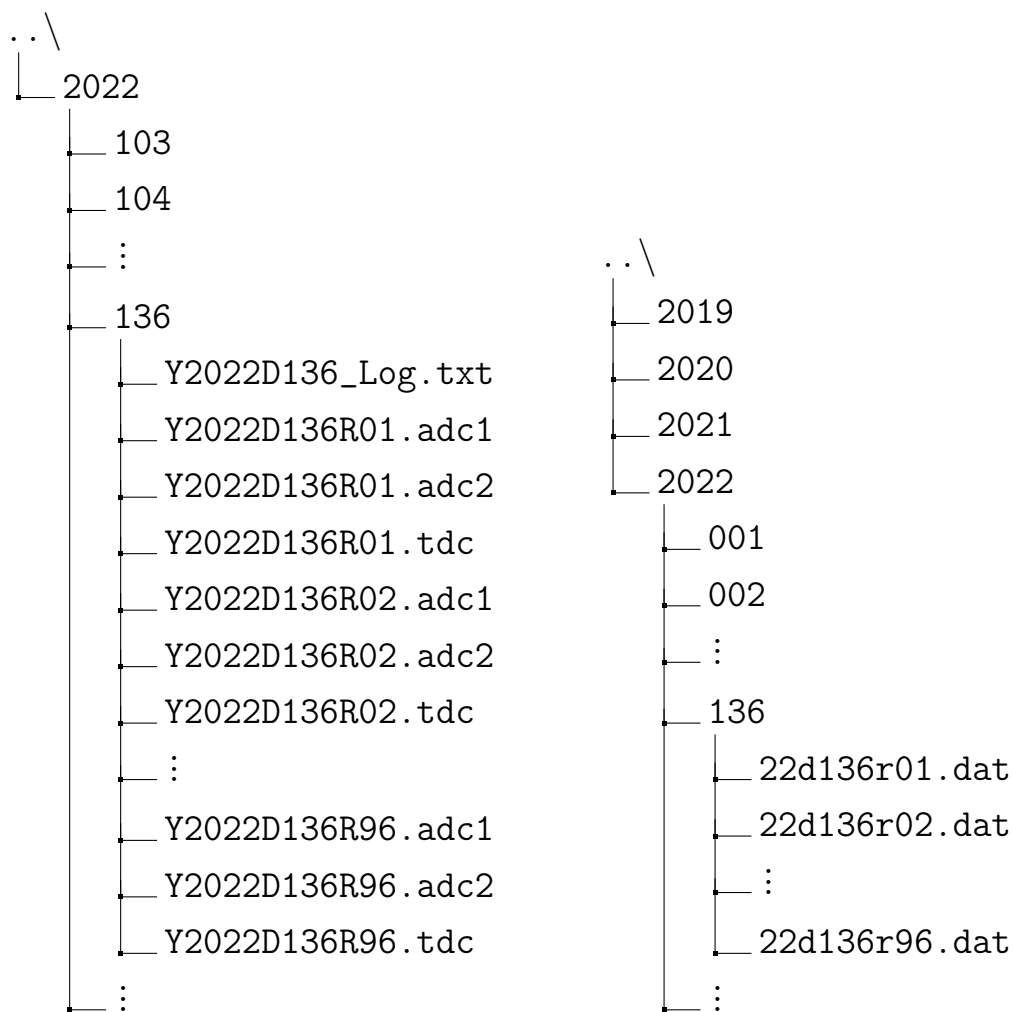


Рисунок 4.11 — Древо каталогов и файлов экспериментальных данных установки «Ковер-3», описание в тексте. Слева – для наземной части установки; справа – для подземного мюонного детектора.

Заключение

Данная диссертация посвящена поиску гамма-излучения сверхвысоких энергий, а также разработке и созданию новой ливневой установки, расположенной в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

В составе научной группы «Ковер-3», принималось активное участие в обработке и обсуждении экспериментальных данных, на всех этапах. Данные работы включали в себя постоянную диагностику и анализ первичных (сырых) экспериментальных данных, с целью поддержания их высокого качества, а также поиска и устранения потенциальных неисправностей в эксперименте. Такой подход позволял обеспечивать высокое качество экспериментальных данных, которые легли в основу полученных научных результатов.

В составе научной группы «Ковер-3», впервые было установлено ограничение на поток гамма-излучения с энергией более 1 ПэВ от 34 направлений прихода нейтрино высоких энергий, зарегистрированных установкой IceCube, на основе данных полученных в эксперименте «Ковер» за период работы с 1999 по 2011 год. Проанализировано нейтринное событие [86], которое находилось в поле зрения установки и в момент времени, когда производился набор данных. Для данного события получено ограничение на флюенс фотонов с энергией более 1 ПэВ.

По данным эксперимента «Ковер», период с 2018 по 2020 год, когда мюонный детектор регистрировал ливни с $n_\mu > 0$, были установлены ограничения на потоки гамма-излучения с энергией более 100 ТэВ и 300 ТэВ, от направлений прихода нейтрино и фотонов высоких энергий, по данным установок IceCube и HAWC соответственно.

Была зарегистрирована потенциальная вспышка-гамма излучения с энергий более 300 ТэВ от области Кокона Лебеда, максимум вспышки по времени совпал с регистрацией нейтринного события IceCube-201120A. Данный резуль-

тат является первым доказательством совместной регистрации фотонов сверхвысокой энергии с астрофизическим нейтрино высокой энергии. Полученные значения потока и флюенса были использованы в работах [98] и [99], в которых моделировались излучение от потенциальных источников. В частности, в работе [99] были объяснены результаты, полученные в эксперименте, для источника PSR J2032+4127/МТ91 213. Что дополнительно подтверждает значимость полученных результатов.

Работая в лаборатории подземного сцинтилляционного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории, совместно с коллегами принимал активное участие в работах по созданию новой установки «Ковер–3». Работы включали расширение наземной части установки, путем создания новых выносных пунктов регистрации (ВПП). На конец мая, собрано и полностью укомплектовано сцинтилляционными счетчиками и другим необходимым оборудованием – 28 ВПП. Было проложено более 3000 метров сигнального кабеля РК–50 подключения ВПП к системе сбора данных наземной части установки. Площадь подземного мюонного детектора (МД) увеличена до 410 м². Был выполнен широкий спектр работ по проверке, включению и настройке новых сцинтилляционных счетчиков МД. Со всей площади МД обеспечен сбор экспериментальных данных, который будет использован в будущих работах группы «Ковер–3».

Была разработана и создана система сбора данных для наземной части установки «Ковер–3», на основе современного цифрового и аналогового измерительного оборудования. Разработана онлайн программа для обеспечения настройки и управления всеми элементами системы сбора данных. Был запущен набор данных, дублирующий работу наземной части установки «Ковер–2», необходимый для проверки и оценки качества работы новой системы сбора данных.

Автор выражает особую признательность своему научному руководителю Петкову Валерию Борисовичу, а также Троицкому Сергею Вадимовичу, Джаппуеву Дахиру Данияловичу, и всему коллективу группы «Ковер-3» за их большой вклад в эту работу.

Хочется выразить отдельную благодарность Московцевой Елене Александровне, Нугаеву Эмину Яткяровичу, Демидову Сергею Владимировичу и Бреевой Анне Александровне за техническую помощь в подготовке диссертации.

Список сокращений и условных обозначений

- АЦП** – Аналого-цифровой преобразователь
БНО – Баксанская нейтринная обсерватория
ВД – Временной дискриминатор
ГАК – Гороскоп амплитудных каналов
ВНР – Выносной пункт регистрации
ВЦП – Время-цифровой преобразователь
ЗЦП – Зарядо-цифровой преобразователь
НКГ – функция Нишимуры-Каматы-Грейзена
ПКЛ – Первичное космическое излучение
ЛПСТ – Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа
МД – Мюонный детектор
р.ч. – Релятивистская частица (энерговыведение)
ФЭУ – Фотоэлектронный умножитель
ШАЛ – Широкий атмосферный ливень
AMON – Astrophysical Multimessenger Observatory Network
ECL – Emitter-coupled logic
GCN – The Gamma-ray Coordinates Network
ISA – Industry Standard Architecture
NIM – Nuclear Instrumentation Module
TTL – Transistor-transistor logic
LVDS – Low-voltage differential signaling
VME – Versa Module Eurocard

Список литературы

- [1] Samorski M., Stamm W. Detection of 2×10^{15} to the 15th to 2×10^{16} 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. et al. 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. et al. 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. и др. 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. et al. Observation of Photons above 300 TeV Associated with a High-energy Neutrino from the Cygnus Region //The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – Т. 916. – №. 2. – С. 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. et al. 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. et al. 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] Gockel A., Wulf T. Beobachtungen über die Radioaktivität der Atmosphäre im Hochgebirge // Phys. Z. – 1908. – T. 9. – C. 907-911.
- [23] Pacini D. Penetrating radiation at the surface of and in water // arXiv preprint arXiv:1002.1810. – 2010.
- [24] Hess V. F. Observations of the penetrating radiation on seven balloon flights // Physik. Zeitschr. – 1912. – T. 13. – C. 1084-1091.
- [25] Никольский С. И. Широкие атмосферные ливни космического излучения // Успехи физических наук. – 1962. – Т. 78. – №. 11. – С. 365–410.
- [26] Kamata K., Nishimura J. The lateral and the angular structure functions of electron showers // Progress of Theoretical Physics Supplement. – 1958. – Т. 6. – С. 93-155.
- [27] Greisen K. Cosmic ray showers // Annual Review of Nuclear Science. – 1960. – Т. 10. – №. 1. – С. 63-108.

- [28] Maze R., Zawadzki A. On an attempt of detection of primary cosmic photons of very high energy // *Il Nuovo Cimento* (1955-1965). – 1960. – Т. 17. – №. 5. – С. 625–633.
- [29] Gawin J. et al. Remarks on mu-poor EAS // *Canadian Journal of Physics*. – 1968. – Т. 46. – №. 10. – С. S75-S77.
- [30] Stamenov J. N. et al. Extensive air showers initiated by primary gamma quanta with energies 102–103 TeV // *Journal of Physics G: Nuclear Physics*. – 1987. – Т. 13. – №. 12. – С. 1579.
- [31] Matsubara Y. et al. Photoproduced muons in EAS and the search for gamma-ray initiated showers beyond 10^{16} eV // *Journal of Physics G: Nuclear Physics*. – 1988. – Т. 14. – №. 3. – С. 385.
- [32] Haungs A. et al. Muon density spectra as a probe of the muon component predicted by air shower simulations // *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*. – 2003. – Т. 122. – С. 384-387.
- [33] Алексеев Е. Н. и др. Установка для изучения центральной части ШАЛ при помощи сцинтилляционного детектора площадью 200 м^2 // *Известия АН СССР, сер. физ.* – 1976. – Т. 40. – С. 994.
- [34] Алексеенко, В. В. 400-канальная сцинтилляционная установка для исследования центральной части ШАЛ: дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук / Алексеев Евгений Николаевич; АН СССР. Ин-т ядер. исслед. — Москва, 1978.
- [35] Алексеенко, В. В. Измерение анизотропии космических лучей с энергией 10^{13} эВ: дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук / Алексеенко Виктор Владимирович; АН СССР. Ин-т ядер. исслед. — Москва, 1988. — 190 с.

- [36] Alexeenko V. V. et al. Baksan EAS experiment on UHE gamma-ray astronomy //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 1991. – Т. 220. – №. 1. – С. 132-136.
- [37] В. В. Алексеенко, В. Н. Бакаганов, Д. Д. Джаппуев и др., Препринт ИЯИ РАН — 1109 (2003).
- [38] Acharya B. S. et al. Extensive air shower experiment at Kolar Gold Fields //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: A. – 1988. – Т. 270. – №. 2-3. – С. 556-571.
- [39] Aglietta M. et al. UHE cosmic ray event reconstruction by the electromagnetic detector of EAS-TOP //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1993. – Т. 336. – №. 1-2. – С. 310-321.
- [40] Aglietta M. et al. Results on candidate UHE gamma-ray sources by the EAS-TOP array (1989–1993) //Astroparticle Physics. – 1995. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-15.
- [41] Mitsui K. et al. Angular resolution of the Ohya air shower detector //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1990. – Т. 290. – №. 2-3. – С. 565-578.
- [42] Alexandreas D. E. et al. The CYGNUS extensive air-shower experiment //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1992. – Т. 311. – №. 1-2. – С. 350-367.
- [43] Borione A. et al. A large air shower array to search for astrophysical sources emitting γ -rays with energies $\geq 10^{14}$ eV //Nuclear Instruments and Methods

- in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1994. – T. 346. – №. 1-2. – C. 329-352.
- [44] Rawat H. S. et al. Possible transient emission from Cygnus X-3 at TeV energies during October 1985 radio flare //Astrophysics and space science. – 1989. – T. 151. – №. 1. – C. 149-156.
- [45] Berezhinsky V. S. Time delay of the PeV gamma ray burst after the October 1985 radio flare of Cygnus X-3 //Nature. – 1988. – T. 334. – №. 6182. – C. 506-507.
- [46] Aglietta M. et al. A limit to the rate of ultra high energy γ -rays in the primary cosmic radiation //Astroparticle Physics. – 1996. – T. 6. – №. 1. – C. 71-75.
- [47] Williams D. A. Results from the CYGNUS extensive air shower array //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 1993. – T. 280. – №. 1. – C. 1181-1188.
- [48] Matthews J. et al. Search for diffuse cosmic gamma rays above 200 TeV //The Astrophysical Journal. – 1991. – T. 375. – C. 202-208.
- [49] Karle A. et al. Search for isotropic γ radiation in the cosmological window between 65 and 200 TeV //Physics Letters B. – 1995. – T. 347. – №. 1-2. – C. 161-170.
- [50] Krimm H. A. et al. Preliminary results from the Chicago air shower array and the Michigan muon array //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 1991. – T. 220. – №. 1. – C. 122-126.
- [51] Borione A. et al. CASA-MIA: A “precision” EAS detector //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 1993. – T. 276. – №. 1. – C. 207-211.
- [52] Chantell M. C. et al. Limits on the isotropic diffuse flux of ultrahigh energy γ radiation //Physical review letters. – 1997. – T. 79. – №. 10. – C. 1805.

- [53] Aartsen M. G. et al. The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems //Journal of Instrumentation. – 2017. – T. 12. – №. 03. – C. P03012.
- [54] Aartsen M. G et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert //Science. – 2018. – T. 361. – №. 6398. – C. 147-151.
- [55] Ahlers M., Halzen F. Opening a new window onto the universe with IceCube //Progress in Particle and Nuclear Physics. – 2018. – T. 102. – C. 73-88.
- [56] Palladino A., Spurio M., Vissani F. Neutrino telescopes and high-energy cosmic neutrinos //Universe. – 2020. – T. 6. – №. 2. – C. 30.
- [57] Kalashev O., Troitsky S. IceCube astrophysical neutrinos without a spectral cutoff and 10^{15} – 10^{17} eV cosmic gamma radiation //JETP letters. – 2015. – T. 100. – №. 12. – C. 761-765.
- [58] Abramowski A., Aharonian F. et al. Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre //Nature. – 2016. – T. 531. – C. 476-479.
- [59] Amenomori M. et al. Search for gamma-rays above 100 TeV from the Crab Nebula with the Tibet air shower array and the 100 m² muon detector //The Astrophysical Journal. – 2015. – T. 813. – №. 2. – C. 98.
- [60] DeYoung T. et al. The HAWC observatory //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2012. – T. 692. – C. 72-76.
- [61] Abeysekara A. U. et al. Measurement of the Crab Nebula spectrum past 100 TeV with HAWC //The Astrophysical Journal. – 2019. – T. 881. – №. 2. – C. 134.

- [62] 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.
- [63] Ackermann M. et al. A cocoon of freshly accelerated cosmic rays detected by Fermi in the Cygnus superbubble //science. – 2011. – Т. 334. – №. 6059. – С. 1103-1107.
- [64] Zhen C. et al. Introduction to large high altitude air shower observatory (LHAASO) //Chinese Astronomy and Astrophysics. – 2019. – Т. 43. – №. 4. – С. 457-478.
- [65] Джаппуев Д. Д. и др. МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ КОВЕР-2 БНО ИЯИ РАН //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2007. – Т. 71. – №. 4. – С. 542-544.
- [66] Воеводский А. В., Дадыкин В. Л., Рязская О. Г. Жидкие сцинтилляторы для больших сцинтилляционных счетчиков //ПТЭ. – 1970. – Т. 1. – С. 85.
- [67] Pouthas J., Engrand M. A timing discriminator for channel plate electron multipliers //Nuclear Instruments and Methods. – 1979. – Т. 161. – №. 2. – С. 331-337.
- [68] Binkley D. M. Performance of non-delay-line constant-fraction discriminator timing circuits //IEEE transactions on nuclear science. – 1994. – Т. 41. – №. 4. – С. 1169-1175.
- [69] Simpson M. L. et al. A monolithic, constant-fraction discriminator using distributed RC delay line shaping //1995 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record. – IEEE, 1995. – Т. 1. – С. 292-296.
- [70] Alexeenko V. V. et al. Baksan CARPET-2 Large Area Muon Detector //23rd International Cosmic Ray Conference (ICRC23). – 1993. – Т. 2. – С. 477.

- [71] Dzhappuev D. D. et al. Studying the muon and hadron components of extensive air showers with the Carpet-2 array //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2009. – Т. 73. – №. 5. – С. 603-605.
- [72] Волченко В. И. Повышение эффективности работы установок для регистрации космических лучей аппаратными средствами //Дисс... к. ф. м. н., Москва, ИЯИ РАН. – 2005.
- [73] Волченко В. И. и др. Измерение энерговыделения в сцинтилляционном детекторе и послеимпульсы ФЭУ //Приборы и техника эксперимента. – 2005. – №. 4. – С. 26-33.
- [74] Troitsky S., Dzhappuev D., Zhezher Y. Carpet results on astrophysical gamma rays above 100 TeV //36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). – 2019. – Т. 36. – С. 808.
- [75] Heck D. et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers //Report fzka. – 1998. – Т. 6019. – №. 11.
- [76] Kalmykov N. N., Ostapchenko S. S. The Nucleus-nucleus interaction, nuclear fragmentation, and fluctuations of extensive air showers //Physics of Atomic Nuclei. – 1993. – Т. 56. – №. 3. – С. 346-353.
- [77] Battistoni G. et al. The FLUKA code: Description and benchmarking //AIP Conference proceedings. – American Institute of Physics, 2007. – Т. 896. – №. 1. – С. 31-49.
- [78] Abraham J. et al. Upper limit on the cosmic-ray photon flux above 10^{19} eV using the surface detector of the Pierre Auger Observatory //Astroparticle Physics. – 2008. – Т. 29. – №. 4. – С. 243-256.
- [79] Troitsky S. V. Axion-like particles and the propagation of gamma rays over astronomical distances //JETP letters. – 2017. – Т. 105. – №. 1. – С. 55-59.

- [80] Vogel H., Laha R., Meyer M. Diffuse axion-like particle searches //arXiv preprint arXiv:1712.01839. – 2017.
- [81] Aartsen M. G. et al. Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data //Physical review letters. – 2014. – Т. 113. – №. 10. – С. 101101.
- [82] Aartsen M. G. et al. Evidence for astrophysical muon neutrinos from the northern sky with IceCube //Physical review letters. – 2015. – Т. 115. – №. 8. – С. 081102.
- [83] Aartsen M. G. et al. Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere using six years of IceCube data //The Astrophysical Journal. – 2016. – Т. 833. – №. 1. – С. 3.
- [84] Aartsen M. G. et al. The IceCube Neutrino Observatory-Contributions to ICRC 2017 Part I: Searches for the Sources of Astrophysical Neutrinos //arXiv preprint arXiv:1710.01179. – 2017.
- [85] Padovani P., Turcati A., Resconi E. AGN outflows as neutrino sources: an observational test //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Т. 477. – №. 3. – С. 3469-3479.
- [86] 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).
- [87] Blaufuss E. et al. The next generation of IceCube realtime neutrino alerts //arXiv preprint arXiv:1908.04884. – 2019.
- [88] Wood J. R. An all-sky search for bursts of very high energy gamma rays with HAWC : дис. – University of Maryland, College Park, 2016.

- [89] Aartsen M. G. et al. Search for steady point-like sources in the astrophysical muon neutrino flux with 8 years of IceCube data //The European Physical Journal C. – 2019. – Т. 79. – №. 3. – С. 1-19.
- [90] 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).
- [91] Abdollahi S. et al. Fermi large area telescope fourth source catalog //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2020. – Т. 247. – №. 1. – С. 33.
- [92] Bykov A. M. et al. High-energy particles and radiation in star-forming regions //Space Science Reviews. – 2020. – Т. 216. – №. 3. – С. 1-37.
- [93] Lyne A. G. et al. The binary nature of PSR J2032+ 4127 //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Т. 451. – №. 1. – С. 581-587.
- [94] Ho W. C. G. et al. Multiwavelength monitoring and X-ray brightening of Be X-ray binary PSR J2032+ 4127/MT91 213 on its approach to periastron //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2017. – Т. 464. – №. 1. – С. 1211-1219.
- [95] Carpet-2 limits on $E > 100$ TeV gamma rays associated with the IceCube 201120A neutrino alert in the Cygnus Cocoon. — Текст : электронный // The Astronomer's Telegram : [сайт]. — URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14237> (дата обращения: 28.05.2022).
- [96] Carpet-2 observation of two $E > 100$ TeV photon-like events associated with the IceCube 201120A neutrino alert in the Cygnus Cocoon. — Текст : электронный // The Astronomer's Telegram : [сайт]. — URL: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=14255> (дата обращения: 28.05.2022).

- [97] 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.
- [98] Bykov A. M., Kalyashova M. E. Modeling of GeV-TeV gamma-ray emission of Cygnus Cocoon //Advances in Space Research. – 2022.
- [99] Bykov A. M. et al. PeV photon and neutrino flares from galactic gamma-ray binaries //The Astrophysical Journal Letters. – 2021. – Т. 921. – №. 1. – С. L10.
- [100] Szabelski J. et al. Carpet-3 a new experiment to study the primary composition around the knee //Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. – 2009. – Т. 196. – С. 371-374.
- [101] Sarkamo J. et al. Developments in shower reconstruction and composition analysis for CARPET-3 EAS array //Astrophysics and Space Sciences Transactions. – 2011. – Т. 7. – №. 3. – С. 307-310.
- [102] Rykalin V. et al. Development of the polystyrene scintillator technology and particle detectors on their base //J. Phys. Sci. Appl. – 2015. – Т. 5. – №. 6. – С. 10.17265.
- [103] Brekhovskikh V. et al. New Generation of Large Scale Scintillation Counters for Detection of EAS and Use in Guard Systems of Experimental Physics Setups //Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Т. 82. – №. 6. – С. 649-656.
- [104] Блочные сцинтилляторы. — Текст : электронный // Производство ГНЦ ИФВЭ Сцинтилляторы Изделия из пластмасс : [сайт]. — UR-ihep.ru/scint/ (дата обращения: 09.05.2022).
- [105] Регулируемые высоковольтные источники питания. — Текст : электронный // Мантигора : [сайт]. — URL: http://mantigora.ru/highvolt_HV.htm (дата обращения: 09.05.2022).

- [106] V2745 64 Channel 16 bit 125 MS/s Digitizer with Programmable Input Gain. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discover : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v2745/> (дата обращения: 20.05.2022).
- [107] VME8100 – 8U 21 Slot VME64/64X Enhanced Crate Series. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/vme8100/> (дата обращения: 11.05.2022).
- [108] A2818 PCI CONET Controller. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/a2818/> (дата обращения: 13.05.2022).
- [109] V2495 Programmable Logic Unit PLUS. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v2495/> (дата обращения: 19.05.2022).
- [110] V812 – 16 Channel Constant Fraction Discriminator. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v812/> (дата обращения: 12.05.2022).
- [111] A954 Cable assembly. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/a954/> (дата обращения: 12.05.2022).
- [112] A967 Cable assembly. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/a967/> (дата обращения: 12.05.2022).
- [113] VX1190B–2eSST 64 Channel Multihit TDC. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/vx1190b-2esst/> (дата обращения: 12.05.2022).

- [114] V792 32 Channel Multievent QDC. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v792/> (дата обращения: 13.05.2022).
- [115] V1742 32+2 Channel 12bit 5 GS/s Switched Capacitor Digitizer. — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v1742/> (дата обращения: 13.05.2022).
- [116] V1190A-2eSST 128 Channel Multihit TDC (100/200/800 ps). — Текст : электронный // CAEN - Tools for Discovery : [сайт]. — URL: <https://www.caen.it/products/v1190a-2esst/> (дата обращения: 14.05.2022).

Список рисунков

1.1	Альберт Гоккель (слева) и результаты его измерений (справа). . .	17
1.2	Слева: маршруты полетов Виктора Гесса. Справа: ионизация, измеренная в 7–м высотном полете Гесса (1912 г.) и в полете Кольхерстера (1914 г.).	18
1.3	Копия работы Д. В. Скобельцина по исследования треков частиц космического излучения в камере Вильсона. Стрелками показаны треки частиц высоких энергий.	19
1.4	Схема развития ШАЛ в атмосфере Земли.	22
1.5	Продольный профиль ШАЛ с энергией 1 ПэВ образованного первичным фотоном (слева) и первичным протоном (справа). Источник: www.iap.kit.edu	27
1.6	Схема установки «Ковер».	31
1.7	Схема установки EAS–TOP.	32
1.8	Схема установки расположенной на шахте Охья.	34
1.9	Схема расположения наземных счетчиков установки CYGNUS–I, а также мюонных детекторов.	36
1.10	Схема установки CASA–MIA.	37
1.11	Слева: распределение числа зарегистрированных ШАЛ с $N_e \geq 10^5$ и $s \geq 1.1$ для склонения $\delta = 40.9^\circ \pm 1.5^\circ$, как функция прямого восхождения. Справа: фазовое распределение событий для ливней с $N_e \geq 10^5$ и $s \geq 1.1$ пришедших с направления: $\delta = 40.9^\circ \pm 1.5^\circ$ и $\alpha = 307.8^\circ \pm 2^\circ$	39

- 1.12 Отношение сигнал/шум для: (а) октября с шагом один день; (б) октября с шагом три дня; (г) периода май–октябрь 1985 года с шагом три дня. (в) профиль радиовспышки в октябре, две стрелки соответствуют гамма–вспышкам, зарегистрированным телескопом Gulmarg [44], с порогом около 6 ТэВ. 41
- 1.13 Слева: распределение событий по прямому восхождению для области склонений $40.9 \pm 3^\circ$. Справа: Фазовое распределение событий из области Лебедь X–3 в окне $\pm 3^\circ \delta$ и $\pm 4^\circ$ R.A. с центром в источнике, пунктирной линией показан ожидаемый фон. 42
- 1.14 Слева: распределение событий в 20-минутном интервале, пришедших от Крабовидной Туманности 23 февраля 1989 года. Пунктирная линия соответствует ожидаемому фону. Справа: относительное фазовое распределение 55 событий. 45
- 1.15 Слева: распределение событий в 15-минутном интервале, пришедших от Крабовидной туманности 23 февраля 1989, года установок KGF и «Ковер». Справа: фазовое распределение зарегистрированных ШАЛ от Крабовидной Туманности. 46
- 1.16 Сравнение числа событий в 15 минутном интервале, зарегистрированных установками EAS–TOP (ромбы), KGF (круги) и «Ковер» (квадраты). Заполненные фигуры соответствуют экспериментальным данным, а пустые – ожидаемому фону. 47
- 1.17 Измерения доли гамма–лучей по отношению к космическим лучам сверхвысоких энергий. Точки со стрелками представляют верхние пределы из экспериментов Юта–Мичиган [48], HEGRA [49] и EAS-TOP [46] и CASA–MIA [52], как указано в легенде. 49
- 1.18 Схема нейтринной обсерватория IceCube. 51

1.19	Карта неба в экваториальных координатах с обозначением нейтринных событий зарегистрированных установкой IceCube.	52
1.20	Дифференциальный энергетический спектр фотонов Крабовидной Туманности по данным установки Tibet AS γ разных лет и других установок.	54
1.21	Энергетический спектр фотонов Крабовидной Туманности по данным установки HAWC, полученный с помощью двух алгоритмов [61], черные и зеленые точки.	55
1.22	Энергетический спектр фотонов Кокона Лебеда по данным установки HAWC [62], в сравнении с другими установками.	56
1.23	Общий вид установки LHAASO.	57
1.24	Сверху: карта неба для энергий выше 100 ТэВ по данным установки LHAASO. Кружками показаны положения известных источников γ -излучения очень высоких энергий (>100 ТэВ).	59
1.25	Пространственное распределение диффузных фотонов зарегистрированных Tibet AS γ	60
2.1	Схема установки «Ковер-2».	63
2.2	Схема стандартного счетчика на основе жидкого сцинтиллятора.	65
2.3	Блок-схема генерации управляющего сигнала, описание в тексте.	67
2.4	Блок-схема генерации управляющего сигнала, описание в тексте.	68
2.5	Блок-схема, демонстрирующая принцип работы системы измерения временных задержек установки «Ковер-2», описание в тексте.	69
2.6	Схема стандартного счетчика на основе пластического сцинтиллятора.	72
3.1	Распределение восстановленных азимутальных углов (слева) и зенитных (справа).	74

- 3.2 Эффективность регистрации гамма-излучения с энергией $E_\gamma > E_{min}$, в предположении спектра фотонов E_γ^{-2} . Синяя пунктирная линия соответствует данным полученным с 1999 по 2011 год, а красная сплошная линия, данным с 2018 года соответственно. 74
- 3.3 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. Жирная вертикальная черта является критерием отбора фотонных кандидатов. 77
- 3.4 Распределение N_{e-n_μ}/N_e для событий зарегистрированных в 2018–2021 годах и прошедших отбор. Голубым отмечена область локализации фотоноподобных событий. 78
- 3.5 Визуализация нейтринного событий IceCube–201120A. 88
- 3.6 Пространственное распределение фотонных кандидатов, зарегистрированных установкой «Ковер–2» и возможных источников. 89
- 3.7 Зависимость вероятности (p -value) от ширины окна с центром, отсчитанным относительно времени прихода нейтрино. Сплошная линия соответствует всем событиям, штриховая – фотонным кандидатам. 91
- 3.8 Распределение всех событий во временном интервале шириной 82 дня. Стрелками показаны дни прихода фотонных кандидатов. Вертикальная пунктирная линия соответствует времени прихода нейтрино, 20 ноября 2020 г. 93

- 3.9 Спектральное распределение энергии для Кокона Лебедя с энергией выше 1 ГэВ. Серый цвет (усредненные по времени значения): линия – поток по данным Fermi–LAT [91]; полый треугольник – данные эксперимента ARGO [97], круги – данные эксперимента HAWC [62]; квадрат – данные полученные в текущем анализе. Красный цвет (значения в предположении вспышки): треугольники – получены, участником группы «Ковер–3» – Егором Подлесным, на основе публичных данных Fermi–LAT; линия – данные полученные в текущем анализе. Фиолетовая звезда – оценка флюенса нейтринного события IceCube–201120A. 94
- 4.1 Схема установки «Ковер–3». Условные обозначения: (А) установка «Ковер», 400 счетчиков на основе жидкого сцинтиллятора; (В) старые выносные пункты на основе жидкого сцинтиллятора; (С) подземный мюонный детектор, 410 счетчиков на основе пластического сцинтиллятора; новые выносные пункты регистрации на основе пластического сцинтиллятора (D)–готовые к работе, (E)–в стадии укомплектации. 97
- 4.2 Схема нового выносного пункта регистрации установки «Ковер–3», описание в тексте. 98
- 4.3 Спектры энерговыделения с восьми произвольных счетчиков МД после настройки коэффициентов усиления ФЭУ. 100

- 4.4 Пример суточного распределения относительных временных задержек переднего и заднего фронта импульса, генерируемого ВД с плавающим порогом сцинтилляционного счетчика МД. Помимо основных распределений можно заметить фоновые (случайные) срабатывания ВД счетчика. Методика точного измерения времени срабатывания каждого счетчика позволяет исключать фоновые события, вызванные прохождением одиночных мюонов, что позволит повысить эффективность регистрации ливней, вызванных первичными фотонами. 102
- 4.5 Фотография крейта VME8100/00 и электроники, входящих в состав системы сбора данных наземной части установки «Ковер-3». Обозначения: (А) – Крейт-контроллер V2718; (В, С) – аналого-цифровой преобразователь V1742; (D) – время-цифровой преобразователь V1190В; (Е) – логический блок V2495; (F-I) – временные дискриминаторы с плавающим порогом V812. 104
- 4.6 Блок схема системы сбора данных наземной части установки «Ковер-3», описание в тексте. 106
- 4.7 Принцип работы системы измерения временных задержек время-цифровым преобразователем, описание в тексте. 108
- 4.8 Древо каталогов и файлов онлайн программы, описание в тексте. 111
- 4.9 Изображение с экрана онлайн компьютера демонстрирующее пример работы онлайн программы, на котором показан результат операции считывания, предобработки и записи данных в файл. Конфигурация системы сбора данных дублирует работу установки «Ковер-2». 112
- 4.10 Блок схема системы сбора данных мюонного детектора установки «Ковер-3», описание в тексте. 115

- 4.11 Древо каталогов и файлов экспериментальных данных установки «Ковер-3», описание в тексте. Слева – для наземной части установки; справа – для подземного мюонного детектора. . 118

Список таблиц

1.1	Результаты наблюдения вспышки в Крабовидной Туманности по данным установок: KGF, Ковер и EAS-TOP.	43
1.2	Ограничения на поток для точечных источников по данным установки CYGNUS [47]	48
1.3	Верхние пределы на поток фотонов по данным установки CASA-MIA для двух выборок. Все единицы $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	49
3.1	Критерии отбора кандидатов в фотоноподобные событий установки «Ковер-2», для двух наборов данных.	78
3.2	Нейтринные события, зарегистрированные установкой IceCube, отобранные для поиска совпадений с кандидатами в фотоноподобные события установки «Ковер-2». Названия (ID) событий соответствуют работе [85]. Прямое восхождение (R.A.) и склонение (DEC) указаны в экваториальных координатах. Еггог указывает область локализации события.	81
3.3	Оповещения, по данным установок IceCube и HAWC, используемые в анализе и взятые из ресурсов GCN [11] и AMON[12].	84
3.4	Верхние пределы на потоки (f) и флюенс (F) гамма-излучения с энергиями более 100 и 300 ТэВ, для 9 оповещений установки HAWC и 22 оповещений установки IceCube.	86
3.5	Верхние пределы на потоки (f) и флюенс (F) гамма-излучения с энергиями более 100 и 300 ТэВ, для двух нейтринных событий находившихся в поле зрения установки, на момент их регистрации.	86