



На правах рукописи

**Лукьянченко Георгий Александрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ  
БЫСТРЫХ ОЦИФРОВЩИКОВ ФОРМЫ  
ИМПУЛЬСА В СОСТАВЕ ДЕТЕКТОРА  
БОРЕКСИНО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ  
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Специальность 01.04.16 —  
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
**Литвинович Евгений Александрович**

Официальные оппоненты: **Полухина Наталья Геннадьевна**,  
доктор физико-математических наук,  
Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Российской академии наук,  
заведующий лабораторией

**Синев Валерий Витальевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук,  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Объединённый институт ядерных исследований

Защита состоится 31 мая 2017 г. в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.03 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу: 123182, Россия, Москва, пл. Академика И.В. Курчатова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

*Бар-5.1*

А.Л. Барабанов

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

При протекании многих астрофизических процессов излучаются или могут излучаться нейтрино и антинейтрино. При этом потоки и спектры испущенных нейтрино зависят от свойств процессов, в которых произошло их рождение, что делает астрофизические нейтрино уникальным источником информации о породивших их астрофизических объектах и процессах. Однако по причине крайне малого сечения взаимодействия нейтрино и относительно малых плотностей потоков нейтрино и антинейтрино от большинства внеземных источников регистрация таких нейтрино представляет значительную экспериментальную сложность. Примерами актуальных задач астрофизики и физики частиц, которые могут быть решены на нейтринных детекторах, являются: подтверждение протекания CNO-цикла на Солнце, регистрация нейтрино от сверхновых и других астрофизических источников, проверка существования гипотетических процессов, таких как осцилляции нейтрино в антинейтрино или распад электрона.

CNO-цикл является одним из двух основных процессов термоядерного синтеза в звездах. В соответствии со Стандартной солнечной моделью (ССМ), вклад CNO-цикла в энергетику Солнца не превышает 1%. Однако он играет ключевую роль в астрофизике, поскольку считается превалирующим процессом преобразования водорода в гелий в звёздах тяжелее Солнца на главной последовательности [1]. Существование CNO-цикла было предсказано в 1938 году, тем не менее, экспериментального подтверждения его протекания на Солнце и в звёздах до сих пор не существует. В процессе реакций  $\beta^+$ -распада, входящих в CNO-цикл, излучаются электронные нейтрино. Прямая регистрация нейтрино — единственный на данный момент экспериментальный способ, позволяющий подтвердить протекание CNO-цикла в недрах Солнца. Современные солнечные модели предсказывают поток CNO-нейтрино на уровне  $\approx (3.8 \div 5.2) \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$  [2].

Другой актуальной задачей современной астрофизики является изучение гравитационных коллапсов сверхновых. Коллапс звезды происходит при достижении ядром звезды массы, превышающей предел Чандрассекара, что приводит к её неустойчивости: силы гравитационного сжатия больше не компенсируются тепловым давлением частиц. Таким образом, внешняя оболочка звезды падает на ядро. Если масса звезды достаточно велика (порядка восьми солнечных масс и более), то во время падения внешней оболочки ядро звезды сжимается до ядерных плотностей и, достигая ядра, оболочка «отражается» от него и начинает распространяться наружу. Распространение ударной волны наружу провоцирует нейтринное охлаждение, в ходе которого рождается большое число нейтрино. Благодаря малому сечению взаимодействия со средой, нейтрино вырываются наружу, унося с собой 99 % гравитационной энергии. Время звездного кол-

лапса составляет примерно 10 секунд, при этом нейтринный всплеск наблюдается раньше вспышки в видимом диапазоне. Регистрация нейтрино от сверхновых позволит изучить процессы, происходящие во время коллапса, а также предупредит астрономов о грядущей световой вспышке звезды. Хотя вспышки сверхновых фиксируются достаточно часто, для их наблюдения современными нейтринными телескопами доступна лишь небольшая область Вселенной – наша галактика и её ближайшие окрестности. Поэтому за всё время существования нейтринных детекторов были зарегистрированы нейтрино лишь от одной вспышки сверхновой в 1987 году в галактике-спутнике Большом Магелановом Облаке. Нейтринный сигнал от этой вспышки был зарегистрирован несколькими детекторами, однако количество зарегистрированных событий было слишком мало для детального изучения развития процессов в сверхновых звёздах [3–6], соответственно, необходимо развить методики регистрации нейтринных и антинейтринных событий от сверхновых в ожидании следующей вспышки.

Ещё одним классом астрофизических задач, представляющих интерес для изучения на нейтринных детекторах, является поиск нейтринного сигнала от малоизученных процессов, в которых некоторыми моделями предполагается возможное испускание нейтрино. Примерами таких процессов могут являться гамма-всплески [7] и солнечные вспышки [8].

На данный момент нейтринным детектором с самым низким энергетическим порогом является детектор Борексино в лаборатории LNGS в центральной Италии. Основной целью международного эксперимента Борексино было изучение субмэвных нейтрино от Солнца. В то же время, поскольку в Борексино был достигнут беспрецедентно низкий уровень фона, этот уникальный детектор имеет огромный потенциал в области изучения нейтрино от астрофизических и редких процессов. Однако электронные системы сбора данных и выработки триггера Борексино были оптимизированы для низкоэнергетической спектроскопии и плохо подходят для регистрации нейтрино и антинейтрино от астрофизических источников. Таким образом, с целью повышения эффективности регистрации внеземных нейтрино, необходимо разработать новые экспериментальные методики, на основе которых реализовать в составе детектора Борексино экспериментальный измерительный комплекс, а также разработать новые алгоритмы анализа данных.

Поскольку для низкостатистических нейтринных экспериментов и экспериментов по регистрации тёмной материи критическим источником фонов являются радиоактивные изотопы и нейтроны, рождающиеся при взаимодействии мюонов космических лучей с материалами детектора, для снижения систематической ошибки в будущих измерениях необходимо накапливать новые данные о наработке этих элементов.

Расширение функциональности Борексино за счёт новой системы сбора данных и измерение с её помощью уровня космогенных фонов в детек-

торе позволит решать широкий комплекс междисциплинарных задач на стыке физики частиц и астрофизики.

**Целью** данной работы являлось: разработка и реализация экспериментального комплекса на базе быстрых оцифровщиков формы импульса (Курчатовский электронно-измерительный комплекс, КЭИК) в составе детектора Борексино для решения задач в области нейтринной астрофизики; разработка методики проведения измерений и программных алгоритмов анализа данных комплекса; определение уровня космогенных фонов в подземном детекторе Борексино при помощи разработанного комплекса.

**Научная новизна и практическая значимость:** Комплекс сбора данных КЭИК основан на быстродействующих АЦП параллельного преобразования с большим количеством каналов, что является современным и перспективным подходом к проблеме сбора данных в нейтринных детекторах. Триггерная система КЭИК, использующая в своём составе программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), разрабатывалась с использованием новых подходов, позволяющих обеспечить максимальную производительность, гибкость и реконфигурируемость триггерной логики. Сочетание быстрых преобразователей формы импульса со специализированной триггерной системой в КЭИК позволяет полностью исключить мёртвое время, что значительно расширяет спектр её использования в низкофоновых экспериментах. Гибкость КЭИК позволяет без существенных переделок использовать её архитектуру в любом другом нейтринном эксперименте, где требуется сбор данных от большого числа каналов.

Для использования КЭИК в актуальных задачах, стоящих перед детектором Борексино, необходима интеграция данных комплекса в единое дерево событий с данными других систем детектора. Все системы Борексино основаны на оригинальном несерийном оборудовании и работают независимо, поэтому интеграция нового комплекса КЭИК потребовала разработки специального алгоритма сопоставления событий.

С использованием КЭИК был разработан новый метод идентификации мюонов космических лучей в детекторе Борексино. Метод основывается на анализе формы импульса с целью отделения черенковского сигнала, создаваемого мюонами, от сигнала сцинтилляционных событий с аналогичным энерговыделением, в том числе с помощью обучаемых алгоритмов. Надёжная идентификация мюонов крайне важна для подавления ложных срабатываний в низкофоновых нейтринных экспериментах.

В результате работы был создан уникальный экспериментальный комплекс для регистрации нейтринного излучения от астрофизических источников, объединяющий низкий энергетический порог Борексино и быстродействие современных методов сбора данных, способный обеспечивать спектрометрию нейтринных событий в энергетическом диапазоне  $1 \div 100$  МэВ без мёртвого времени.

Были получены новые результаты по скорости наработки космогенных радиоактивных элементов  $^{12}\text{B}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^9\text{Li}$  и нейтронов при взаимодействии космических мюонов с жидким органическим сцинтиллятором (ЖОС) на основе псевдокумола на глубине 3800 м водного эквивалента. Для нейтронов была получена средняя множественность рождения.

### Достоверность

Экспериментальные результаты, полученные с использованием разработанной системы КЭИК, соответствуют теоретическим предсказаниям и результатам других экспериментов, что подтверждает их достоверность и функциональность системы.

Теоретической и методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных авторов в области построения установок для изучения нейтрино и антинейтрино. Исследования космогенного фона в подземных детекторах ранее проводилось в нескольких экспериментах (например, на детекторе LVD), однако изучение наработки космогенных изотопов в ЖОС на основе псевдокумола на глубине расположения Borexino (3800 м водного эквивалента) было осуществлено впервые.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и создание экспериментального комплекса на базе быстрых оцифровщиков формы импульса с гибкой триггерной логикой (Курчатовский электронно-измерительный комплекс, КЭИК), исключающей мёртвое время, в составе Борексино для решения задач нейтринной астрофизики в диапазоне энергий  $1 \div 100$  МэВ.
2. Разработка и реализация на основе данных КЭИК нового метода классификации событий в жидко-сцинтилляционном детекторе Борексино, идентификации космических мюонов, сцинтилляционных и шумовых событий с помощью обучаемых алгоритмов. Разработка алгоритма интеграции данных КЭИК в единую структуру анализа Борексино.
3. Измерение по данным КЭИК и других подсистем Борексино параметров удельного выхода и средней множественности нейтронов в жидком органическом сцинтилляторе на основе псевдокумола под воздействием потока космических мюонов на глубине 3800 м водного эквивалента.
4. Измерение параметров наработки радиоактивных космогенных изотопов ( $^{12}\text{B}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^9\text{Li}$ ) в жидком органическом сцинтилляторе на основе псевдокумола под воздействием потока космических мюонов на глубине 3800 м водного эквивалента.

**Личный вклад.** Автор внёс определяющий вклад в разработку и создание системы КЭИК в составе детектора Борексино, а также проводил анализ данных, полученных при помощи системы. Автором был осуществлён следующий комплекс научных и научно-технических работ:

1. Разработка архитектуры экспериментального комплекса.
2. Создание и наладка системы сбора данных на базе быстрых АЦП с шиной VME и реализация гибкой триггерной системы на базе ПЛИС.
3. Разработка «онлайн» программного обеспечения сбора данных системы.
4. Обеспечение работоспособности КЭИК и процесса сбора данных с 2011 по 2016 год.
5. Разработка базовых методов и алгоритмов «оффлайн» анализа данных КЭИК, а также алгоритмов интеграции данных КЭИК в общую структуру анализа эксперимента Борексино.
6. Разработка метода выделения в данных КЭИК сцинтилляционных событий и событий, вызванных мюонами космических лучей.
7. Изучение с помощью КЭИК космогенных нейтронов, нарабатываемых при взаимодействии космических мюонов со сцинтиллятором Борексино.
8. Изучение с помощью КЭИК космогенных радиоактивных изотопов в Борексино.

**Апробация работы.** Материалы данной работы многократно представлялись автором на регулярных совещаниях коллаборации Борексино и получили одобрение коллаборации. Результаты работы докладывались автором на Международных сессиях-конференциях секции ядерной физики ОФН РАН (Москва) в 2012 и 2014 годах и Международной конференции по физике частиц и астрофизике 2015 (Москва). Основные результаты работ опубликованы автором в трёх статьях в журналах, входящих в список ВАК: *Physics of Atomic Nuclei*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* (в составе коллаборации Борексино), *Physical Review D* (в составе коллаборации Борексино). Также результаты публиковались автором в статье в журнале *Journal of Physics: Conference Series* и с соавторами в двух препринтах НИЦ «Курчатовский институт». Помимо этого, автор входит в число соавторов пяти статей в международных журналах, опубликованных коллаборацией Борексино.

### **Публикации:**

1. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Cosmogenic backgrounds in Borexino at 3800 m water-equivalent depth // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2013. — Vol. 2013, no. 8. — P. 049.
2. Lukyanchenko G. The status of the study of solar CNO neutrinos in the Borexino experiment // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2015. — Vol. 78, no. 14. — P. 1621-1623.
3. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data //

- Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2015. – Vol. 92, no. 3. – 031101.
4. Lukyanchenko G., Litvinovich E. Data acquisition system based on fast waveform digitizers for large neutrino detectors // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 675, no. 1. – P. 39. – 012037.
  5. Литвинович Е. А., Лукьянченко Г. А. [и др.] Система сбора данных на основе быстрых оцифровщиков формы импульса / 2013. – Препринт / Нац. исследовательский центр «Курчатовский институт» ИАЭ-6756/2.
  6. Agostini M., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Test of Electric Charge Conservation with Borexino // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 115, no. 23. – 231802.
  7. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy // Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2014. – Vol. 89, no. 11.
  8. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun // Nature. – 2014. – Vol. 512, no. 7515. – P. 383–386.
  9. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) New limits on heavy sterile neutrino mixing in B8 decay obtained with the Borexino detector // Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2013. – Vol. 88, no. 7. – 072010.
  10. Bellini G., .. , Lukyanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino // Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and HighEnergy Physics. – 2013. – Vol. 722, 4-5. – P. 295–300.
  11. Литвинович Е. А., Лукьянченко Г. А. [и др.] Проверка эффекта превышения скорости света нейтрино в эксперименте Церн – Гран Сассо / 2012. – Препринт / Нац. исследовательский центр «Курчатовский институт» ИАЭ-6700/2.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 113 страниц, включая 34 рисунка и 12 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

## Содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности темы, сформулирована цель и задачи исследования, показана практическая значимость всей работы в целом, а также приведены положения, выносимые на защиту.



В первой главе приводится описание эксперимента Борексино: устройство детектора, основные физические задачи и результаты эксперимента. Также в первой главе рассматривается структура электроники сбора данных Борексино.

Основной целью эксперимента Борексино является изучение потока низкоэнергетических электронных нейтрино от Солнца. Борексино – нейтринный детектор, позволяющий производить спектроскопические измерения с энергетического порога  $\approx 100$  кэВ. На настоящий момент Борексино имеет самый низкий энергетический порог регистрации нейтрино среди всех детекторов реального времени.

Теоретически предсказываемые с учётом эффекта осцилляций потоки солнечных нейтрино для двух наиболее признанных вариантов Стандартной солнечной модели («высокометаллическая» GS98 [9] и «низкометаллическая» AGSS09 [10]) и экспериментальные результаты Борексино по состоянию на 2016 год представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Теоретически предсказанные потоки нейтрино солнечного спектра (приводятся по [2]) и результаты измерения Борексино [11–13].

	Энергия, МэВ	Ожидаемый поток (GS98), $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Ожидаемый поток (AGSS09), $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Эквив. поток с уч. осцилляций, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
pp	$< 0.42$	$(5.98 \pm 0.04) \cdot 10^{10}$	$(6.03 \pm 0.04) \cdot 10^{10}$	$(6.6 \pm 0.7) \cdot 10^{10}$
CNO	$< 1.74$	$(5.24 \pm 1.10) \cdot 10^8$	$(3.76 \pm 0.79) \cdot 10^3$	$< 7.7 \cdot 10^8$
per	1.442	$(1.44 \pm 0.02) \cdot 10^8$	$(1.47 \pm 0.02) \cdot 10^8$	$(1.6 \pm 0.4) \cdot 10^8$
${}^7\text{Be}$	0.862	$(4.47 \pm 0.31) \cdot 10^9$	$(4.08 \pm 0.29) \cdot 10^9$	$(4.4 \pm 0.2) \cdot 10^9$
${}^7\text{Be}$	0.385	$(0.53 \pm 0.04) \cdot 10^9$	$(0.48 \pm 0.03) \cdot 10^9$	—
${}^8\text{B}$	$< 14.06$	$(5.58 \pm 0.78) \cdot 10^6$	$(4.59 \pm 0.64) \cdot 10^6$	$(5.2 \pm 0.9) \cdot 10^6$
hep	$< 18.77$	$(8.04 \pm 0.24) \cdot 10^3$	$(8.31 \pm 0.25) \cdot 10^3$	—

Детектор Борексино располагается в подземной лаборатории Гран-Сассо (LNGS) в центральной Италии на глубине 3800 м водного эквивалента, схема детектора представлена на рисунке 1. Основной особенностью детектора является беспрецедентно высокая степень радиохимической чистоты скнтиллятора и конструкционных материалов, столь необходимая в низкоэнергетических экспериментах, содержание  ${}^{238}\text{U}$  и  ${}^{232}\text{Th}$  в скнтиллаторе не превышает  $10^{-18}$  г/г. Мишенью Борексино служат 278 тонн жидкого органического скнтиллятора, заключённые в тонкой (125 мкм) нейлоновой сфере радиусом 4.25 м. Основой скнтиллятора является 1,2,4-триметилбензол (РС) с добавлением в качестве скнтиллирующей добавки 1.5 г/л 2,5-диметиллоксазола (РРО). Внутренняя сфера со скнтиллятором расположена внутри другой нейлоновой сферы радиусом 5.5 м, заполненной РС с добавлением 5 г/л диметилфталата (DMP) для подавления собственных скнтилляций РС. Две концентрические нейлоновые сферы находятся

внутри стальной сферы радиусом 6.85 метра, которая также заполнена РС с добавкой DMP (внутренний детектор). На стальной сфере установлены 2212 восьмидюймовых ФЭУ, изготовленных из низкорadioактивных материалов. Стальная сфера расположена внутри цилиндрического бака радиусом 9 метров и высотой 16.9 метра, содержащего 2100 м<sup>3</sup> сверхчистой воды, экранирующей чувствительный объем от радиоактивности окружающих пород. Внутри водяного бака установлены 208 ФЭУ (внешний черенковский детектор), обеспечивающих активное veto детектора от мюонов космических лучей. Нейтрино всех флейворов регистрируются детектором по рассеянию на электронах в сцинтилляторе, электронные антинейтрино – по реакции обратного  $\beta$ -распада.

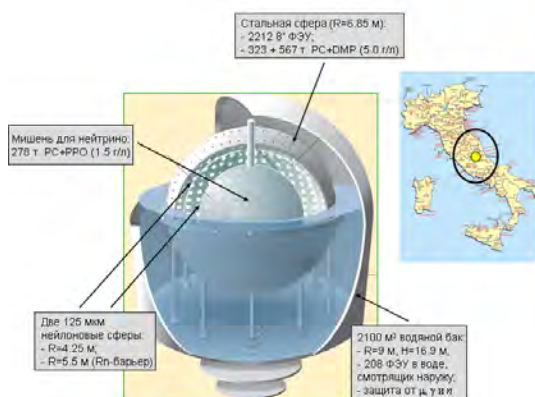


Рисунок 1 — Схема детектора Борексина и положение лаборатории LNGS, где он расположен.

Основными компонентами электроники внутреннего детектора (исключая систему КЭИК, описанную в главе 2) являются:

- фотоэлектронные умножители (ФЭУ);
- блоки высоковольтного питания ФЭУ;
- входные каскады электроники;
- низкоэнергетическая система сбора данных LABEN;
- триггерная подсистема для LABEN, называемая ВТВ;
- система контроля темновых шумов;

Электроника внутреннего детектора организована в стойки, в каждой из которых присутствует один крейт с шиной VMEbus. На 2016 год всего имеется 13 (на момент начала сбора данных в 2007 году 14) стоек, каждая из которых обеспечивает сбор данных со 160 (или менее) ФЭУ. Триггерная подсистема установлена в отдельную стойку со своим VME-крейтом. Схема одного канала электроники представлена на рисунке 2 [14].

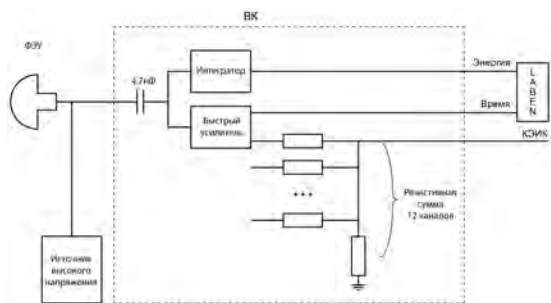


Рисунок 2 — Схематическое изображение одного канала электроники Борексино.

**Вторая глава** посвящена описанию разработанного автором Курчатова электронно-измерительного комплекса (КЭИК) в составе детектора Борексино.

Ввиду того, что первичной задачей, ставившейся перед Борексино, была спектроскопия субмэвных солнечных нейтрино, основная электроника детектора обладает рядом недостатков, снижающих её эффективность в задаче регистрации нейтрино от астрофизических источников. Основными недостатками основной системы сбора данных являются наличие неустраняемого мёртвого времени после каждого триггера и невозможность спектроскопии в случае большого числа событий за короткий временной интервал ( $< 1\text{мс}$ ). Также основная электроника была оптимизирована для спектроскопических измерений в области энергий не более 10-15 МэВ и не позволяет точно определять энергию более высокоэнергетических событий. Однако по мере набора данных становилась очевидной необходимость альтернативной системы сбора данных, не обладающей перечисленными недостатками и позволяющей реализовать потенциал Борексино к регистрации редких событий с энергиями более 15 МэВ в рамках решения разнообразных задач экспериментальной нейтринной астрофизики. Это, прежде всего, задачи, связанные с непрерывным мониторингом нейтринных и антинейтринных сигналов, обусловленных источниками космического происхождения (вспышки сверхновых звезд, гамма-всплески, диффузный поток нейтрино и др.). В качестве системы для решения описанных задач был разработан и внедрён в структуру сбора данных Борексино экспериментальный комплекс КЭИК.

Курчатовский электронно-измерительный комплекс построен на основе быстрых аналого-цифровых преобразователей и цифровой триггерной подсистемы. Основными характеристиками системы КЭИК являются:

1. широкий энергетический диапазон регистрации событий (от 1 до  $\sim 100$  МэВ);
2. гибкая логика выработки главного триггера регистрации;
3. отсутствие мёртвого времени между событиями;

4. независимость системы от низкоэнергетического комплекса сбора данных Борексино.

Система КЭИК состоит из следующих компонентов:

1. аналоговые схемы для суммирования сигналов;
2. набор VME-модулей АЦП (подсистема сбора данных);
3. VME-модуль выработки триггера (на основе ПЛИС);
4. модули-распределители триггерных сигналов и тактовых частот;
5. VME-модуль программируемых дискриминаторов;
6. дискриминатор внешнего детектора;
7. подсистема часов астрономического времени (GPS);
8. управляющая одноплатная ЭВМ (в VME-исполнении).

Система располагается в четырёх VME-крейтах, объединённых в единое виртуальное адресное пространство. На рисунке 3 представлена общая блок-схема системы КЭИК.

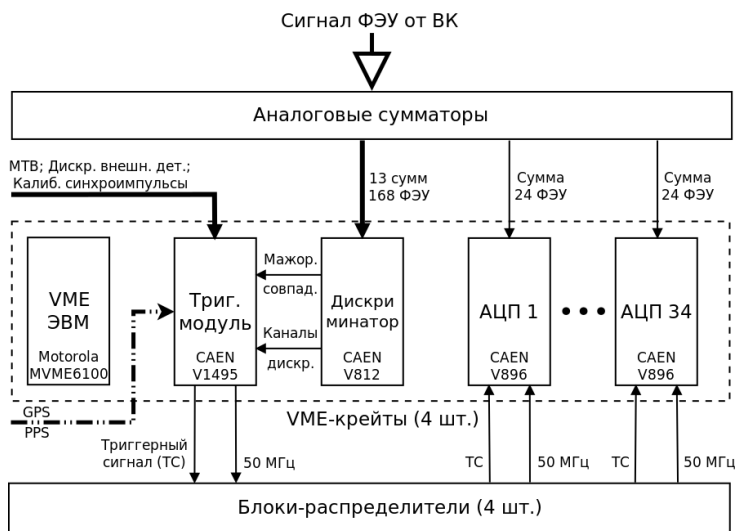


Рисунок 3 — Общая блок-схема системы КЭИК.

Источником сигналов для системы КЭИК являются входные каскады (ВК) основной системы сбора данных. В этих модулях происходит усиление сигналов от ФЭУ и первичное резистивное суммирование (до 12 ФЭУ на модуль). Система ВК смонтирована в стойки, по 14 модулей на стойку. Всего имеется 13 стоек. В каждой стойке имеется два модуля восьмивходовых активных аналоговых сумматоров системы КЭИК, к которым подключены выходы суммы ФЭУ с модулей ВК. Каждый сумматор предоставляет 4 попарных суммы сигналов ФЭУ от входных каскадов и 2 копии суммы всех 8 входных каскадов. Суммы по 2 (до 24 ФЭУ) подаются на входы АЦП системы КЭИК. Суммы по 8 попарно суммируются для получения

суммарного сигнала со всех ФЭУ каждой стойки, и результирующие сигналы подаются на входы дискриминаторов КЭИК. Кроме того, все суммы на 8 от сумматоров каждой из 13 стоек суммируются отдельным сумматором для получения полной аналоговой суммы сигналов ФЭУ со всего внутреннего детектора. Этот суммарный сигнал подаётся на выделенный канал АЦП.

Выработка триггера системы КЭИК основывается на дискриминации аналоговых сумм сигналов от ФЭУ. В системе используется 16-канальный дискриминатор со следящим порогом с интерфейсом VME (CAEN V812). На входы каналов дискриминатора подаются 13 аналоговых сумм ФЭУ по стойкам и одна полная сумма всех ФЭУ. Пороги каждого канала дискриминатора настраиваются через VME-интерфейс в диапазоне  $1 \div 255$  в зависимости от количества работающих ФЭУ в данной стойке. Модуль дискриминатора обладает встроенной системой мажоритарной логики, работающей по принципу многоканальной схемы совпадений. Уровень мажоритарности задаётся через VME. Цифровые маркеры срабатывания отдельных каналов дискриминатора и сигнал мажоритарного совпадения подаются в триггерный модуль. Триггерный модуль предназначен для выработки сигнала триггера, когда это необходимо, и принятия решения о запрете выработки триггера, когда регистрация события является почему-либо нежелательной. Дополнительными функциями триггерной подсистемы являются регистрация информации о свойствах выработанного триггера, учёт мёртвого времени и оценка средних скоростей счёта различных типов событий. Триггерный модуль системы КЭИК построен на основе VME-модуля V1495 производства CAEN, содержащего в себе доступную для реконфигурации программируемую логическую матрицу (ПЛИС). Функциональность триггерного модуля реализована программированием данной ПЛИС, имеющей доступ к шине VME. Внутреннее устройство триггерного модуля приведено на рисунке 4. Он состоит из пяти подустройств:

1. Устройство выработки триггерных сигналов для АЦП.
2. Устройство хранения триггерной информации (FIFO).
3. Устройство подсчета мертвого времени.
4. Устройство подсчета интенсивностей следования различных сигналов.
5. Устройство формирования временной GPS метки.

Устройство выработки триггерных сигналов является основным в модуле, остальные обеспечивают сервисные функции. Параметры всех устройств программируются через шину VME во время работы схемы, не требуя при этом реконфигурации ПЛИС. Также через шину VME осуществляется чтение данных от сервисных устройств. Двоичный файл конфигурации микросхемы ПЛИС аналогично может быть загружен в триггерный модуль посредством интерфейса VME.

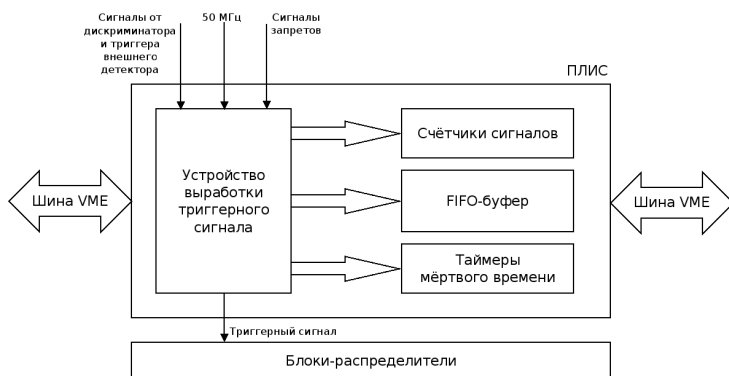


Рисунок 4 — Схема внутреннего устройства триггерного модуля с внешними подключениями.

Основным источником физических триггеров системы является выход мажоритарных совпадений дискриминатора. Источником дополнительных триггеров являются выходы двух независимых триггеров внешнего детектора Борексино. Помимо физического события в детекторе, срабатывание дискриминатора может быть вызвано калибровочными сигналами основной системы сбора данных (калибровочным лазером и генератором). Поскольку такие события не несут физической информации, триггерный модуль отклоняет часть подобных событий с целью подавления потока данных (фактор подавления устанавливается программно). Запреты на выработку триггера формируются на основе цифровых маркеров калибровочных сигналов, заведённых в триггерный модуль. Кроме того, триггерный модуль реализует подавление триггера, пришедшего в течение временного окна АЦП после предыдущего (автоблокировка). Всего триггерным модулем поддерживается до четырёх источников триггерного сигнала и до четырёх источников запрета. Устройство выработки сигнала триггера состоит из схемы выработки кандидата, схемы выработки запрета, схемы пропуска (антисовпадений кандидата и запрета), линии задержки на сдвиге регистре и связанной с ней схемой автоблокировки, а также схемы фазирования выходного сигнала с внешним тактовым сигналом АЦП. В устройстве реализован синхронный разветвитель для выходных задержанных сигналов и соответствующего внешнего тактового сигнала на четыре выхода, которые выводятся на блоки-распределители с целью их последующего распределения на все АЦП. Кроме того, имеется отладочный выход схемы суммы всех запретов и светодиодная индикация триггеров и запретов. В качестве общего тактового сигнала синхронизации всех цепей в ПЛИС используется тактовый сигнал VME с частотой 40 МГц.

Основой системы сбора данных являются 34 модуля быстрых параллельных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в VME-конструктиве типа V896 производства компании CAEN. Каждый модуль АЦП имеет 3

независимых канала с частотой дискретизации 400 МГц и динамическим диапазоном 8 бит, итого система содержит 102 канала оцифровки. Каждый канал модуля V896 имеет по 256 кбайт двухпортовой статической памяти данных, разбитой на 512 страниц по 512 байт каждая. Архитектура памяти позволяет одновременно производить запись данных АЦП и их чтение по шине VME, что обеспечивает полное отсутствие мёртвого времени. Размер окна данных на одно событие в КЭИК составляет 1.28 мкс (512 оцифровок АЦП; 2.5 нс на оцифровку). Помимо сумм по 24 ФЭУ отдельными каналами оцифровываются полная аналоговая сумма со всех ФЭУ внутреннего детектора, ослабленная аналоговая сумма (фактор ослабления 3.2), полная аналоговая сумма с ФЭУ внешнего детектора и некоторые служебные сигналы. Несколько каналов АЦП находятся в горячем резерве. Пример оцифрованного системой КЭИК события представлен на рисунке 5. В этом примере система произвела оцифровку пяти событий в одном окне сбора данных. Эти события представляют собой гамма-кванты с энергией 2.2 МэВ, которые образовались в результате захвата космогенных нейтронов ядрами водорода в сцинтилляторе детектора Борексина.

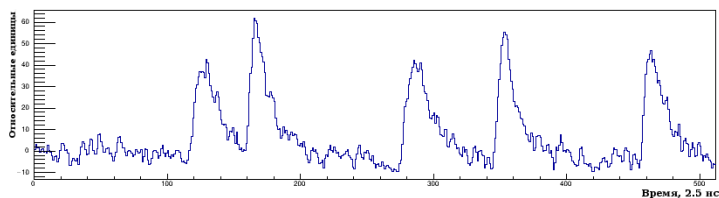


Рисунок 5 — Пример формы импульса, оцифрованных КЭИК для  $\gamma$ -квантов от захвата группы космогенных нейтронов (энергия 2.2 МэВ).

Управление процессом сбора данных системы КЭИК производится одноплатной управляющей ЭВМ, установленной в одном из крейтов. В качестве такой ЭВМ используется Motorola MVME6100 с VME-интерфейсом, основанная на процессоре Freescale MPC7457, использующая операционную систему Debian GNU/Linux. В качестве диска для промежуточного хранения накопленных данных служит сетевое хранилище с резервированием, подключенное через сетевой адаптер 1 Гбит/с Ethernet. Всё программное обеспечение системы КЭИК построено таким образом, что большинство определяющих работу системы параметров может быть изменено программно. При инициализации системы оператор имеет возможность менять через веб-интерфейс все конфигурируемые параметры, такие как: пороги дискриминатора, задержка триггерного сигнала, параметры запретов и т.д. Это позволяет при необходимости значительно изменить условия сбора данных без реконфигурации ПЛИС или изменения программы сбора данных, что обеспечивает гибкость системы и возможность удалённого контроля. Максимальная обрабатываемая средняя загрузка системы КЭИК

составляет около 15 событий в секунду. Учитывая, что средняя частота событий в детекторе, вызывающих срабатывание мажоритарного триггера КЭИК с порога 1 МэВ, не превышает 1 Гц, производительность системы является более чем достаточной для выполнения поставленных перед ней задач.

**Третья глава** посвящена разработанным автором программным алгоритмам оффлайн анализа данных КЭИК, требуемым для решения поставленных перед ней задач. Для успешного использования системы сбора данных необходимо иметь критерии разделения событий системы по классам исходных физических процессов в детекторе с целью отделения фонового сигнала от искомого.

Одним из важнейших компонентов фона в задачах регистрации нейтрино от астрофизических и редких процессов, являются распады радиоактивных элементов, рождающихся в детекторе под действием высокоэнергетичного атмосферного мюонного излучения. Базовым критерием идентификации мюонов в Борексине является наличие сигнала во внешнем детекторе. Поскольку космические мюоны (а также мюоны, рождённые при взаимодействии мюонных нейтрино с окружающим детектор веществом) проникают в детектор извне и являются релятивистскими частицами, то проходя через внешний водяной детектор они образуют черенковский свет, регистрируемый ФЭУ внешнего детектора. Однако по причине неполного покрытия ФЭУ пространства водяного бака около 0.75 % мюонов не приводят к выработке триггера внешнего детектора. Также комплекс КЭИК может функционировать при неактивной системе внешнего детектора. Таким образом, для успешного подавления фона критичен алгоритм выделения событий, вызванных мюонами, по данным лишь от внутреннего детектора, полученным с помощью КЭИК.

Несмотря на комплексную триггерную логику, в данных, набираемых КЭИК, присутствует значительное количество событий, вызванных не регистрацией частицы в детекторе, а шумами электронно-измерительного тракта (в первую очередь усилителей ВК), либо паразитной засветкой ФЭУ. Во избежание ложного определения подобных событий как физического сигнала необходим надёжный фильтр, разделяющий спинтилляционные и шумовые события.

Данные КЭИК на этапе подготовки к анализу проходят преобразование из «сырых» данных АЦП в формат принятого в экспериментальной физике частиц пакета обработки данных ROOT. На этом этапе автором реализованы алгоритмы, определяющие внутри окон АЦП импульсы, называемые кластерами, соответствующие отдельным событиям, и алгоритмы, реконструирующие энерговыделение частиц в детекторе (например, на рисунке 5 программа выделила 5 кластеров). Энергетическое разрешение  $\sigma/E$  системы КЭИК для энергии 1 МэВ составляет около 11 %.



Автором работы реализован фильтр, разделяющий события системы КЭИК на три основных класса: «точечные» сцинтилляционные события, треки высокоэнергетичных мюонов и электронные шумы. Для классификации событий используются три обучаемых алгоритма: искусственная нейронная сеть типа многослойный перцептрон (multilayer perceptron, MLP), метод опорных векторов (support vector machines, SVM) и дерево принятия решений с бустингом (boosted decision tree, BDT). Все три алгоритма были предварительно натренированы на выверенной выборке событий значительного объёма (порядка десятка тысяч событий каждого класса) для классификации отдельно взятого кластера внутри окна АЦП, как вызванного треком мюона, сцинтилляцией, либо шумовым сигналом. Для принятия решения классификаторы используют форму импульса события и дополнительные параметры, определяющие распределение сигнала по каналам оцифровки. При этом итог работы каждого классификатора хранится в результирующих данных независимо, поскольку было обнаружено, что разные обучаемые алгоритмы имеют неэффективность на разных классах событий. Для реализации тренируемых алгоритмов использовалась библиотека для мультивариативного анализа TMVA из пакета ROOT. Для мюонов также реализован откалиброванный вручную критерий отбора по форме импульса. Принцип отбора основывается на различиях фронтов точечных сцинтилляционных импульсов и мюонных треков, пересекающих детектор и дающих черенковское излучение.

На рисунке 6 отображена неэффективность отбора мюонов по форме импульса относительно отбора по сигналу внешнего детектора в зависимости от энергии. Полагая неэффективности внешнего детектора и анализа формы импульса внутренними независимыми, получаем полную вероятность идентифицировать мюон, прошедший через внутренний детектор, равной 0.999969, что при среднем количестве  $(4310 \pm 10)$  мюонов [15], проходящих через детектор в сутки, соответствует  $(0.13 \pm 0.01)$  пропущенных мюона за сутки.

После первичной обработки данных и преобразования их в формат ROOT производится процедура сопоставления данных системы КЭИК с данными от низкоэнергетической системы сбора данных. Поскольку системы полностью независимы и имеют различную длину окна оцифровки, соответствие между событиями ищется с помощью специального алгоритма, на основании поступающего в триггерную систему КЭИК синхромаркера от низкоэнергетичной триггерной системы, сопоставления GPS времён событий (однако GPS метка, значительно повышающая надёжность сопоставления, присутствует не во всех набранных данных) и других критериев. Пример формы импульса сопоставленного события представлен на рисунке 7. Проведённая таким образом интеграция в единое дерево событий данных от разных подсистем Борексино позволяет членам колла-

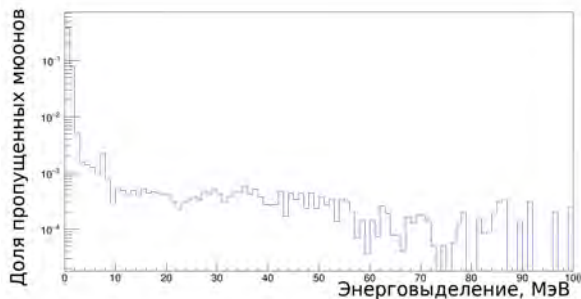
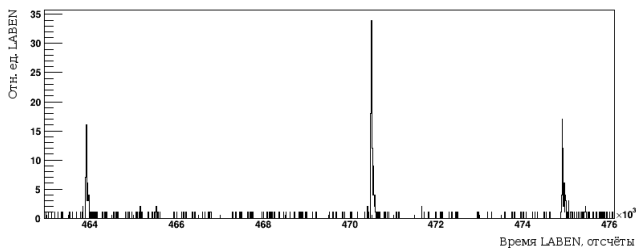
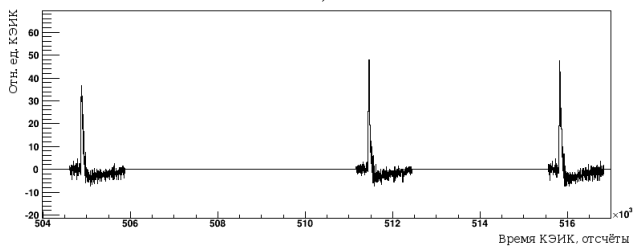


Рисунок 6 — Зависимость доли мюонов, помеченных внешним детектором, но пропущенных анализом формы импульса внутреннего детектора от энерговыделения во внутреннем детекторе.

борации проводить комплексный анализ, использующий сильные стороны обеих систем сбора данных.



а)



б)

Рисунок 7 — Пример события, объединённого с помощью системы интеграции данных КЭИК. На рисунке а) представлена временная диаграмма срабатывания ФЭУ LABEN, на рисунке б) — соответствующая форма импульса КЭИК. Рисунки выровнены, чтобы кластеры, между которыми было обнаружено соответствие, находились друг под другом, при этом событие содержит несколько объединённых окон КЭИК.

**Четвёртая глава** посвящена изучению параметров космогенного фона в Борксино с помощью КЭИК.

В первой части главы кратко рассматриваются процессы взаимодействия мюонов с веществом скintиллятора в подземных детекторах и приводятся данные по космогенным фонам, полученные в экспериментах KamLAND и LVD.

Исходный поток космических мюонов на уровне поверхности Земли ( $6.5 \cdot 10^5$  мюонов / ( $\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ )) ослабляется, проходя сквозь скальную породу над детектором Борексино, примерно в  $10^6$  раз, что соответствует 3800 метрам водного эквивалента экранировки. Благодаря этому средняя энергия мюонов в лаборатории LNGS составляет около 280 ГэВ, в то время как на поверхности земли – 1 ГэВ, поскольку мюоны низких энергий поглощаются породой [16]. Наблюдаемое угловое распределение мюонов отражено на рисунке 8, как функция астрономических зенитного и азимутального углов, при этом, поскольку внутренний чувствительный объём детектора Борексино имеет сферическую форму, то чувствительность к мюонам с разными направлениями одинакова. Распределение отражает влияние особенности горного ландшафта в районе лаборатории LNGS – разница в толщине горной породы влияет на плотность остаточного мюонного потока под разными углами. Средняя скорость счёта мюонов в Борексино составляет  $(4310 \pm 2_{\text{стат}} \pm 10_{\text{сист}})$  мюонов/сутки.

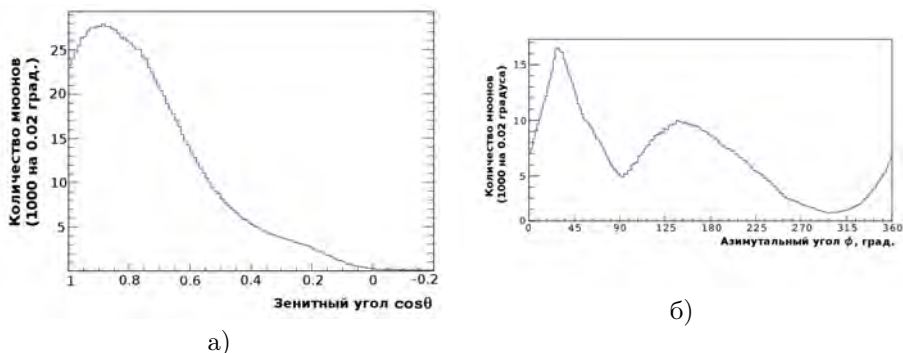


Рисунок 8 — Угловое распределение мюонов, проходящих сквозь внутренний объём Борексино. На рисунке а) представлена проекция на угол зенита ( $\theta$ ), на рисунке б – на азимутальный угол ( $\phi$ ).

С целью детального изучения фоновых для нейтринного анализа процессов в эксперименте Борексино были изучены рождающиеся при взаимодействии мюонов с ЖОС детектора нейтроны и радиоактивные изотопы.

Космические мюоны, проходя через детектор, образуют быстрые нейтроны. Рассеиваясь на ядрах водорода и углерода в скintилляторе, нейтроны замедляются до тепловых энергий в течение нескольких десятков наносекунд. Характерное время захвата тепловых нейтронов в жидком органическом скintилляторе Борексино составляет 250 мкс и последую-

щее гамма-излучение регистрируется в детекторе. Энергия излучаемых  $\gamma$ -квантов составляет  $\approx 2.22$  МэВ в случае захвата нейтрона ядром водорода и  $\approx 4.95$  МэВ в случае захвата на ядре  $^{12}\text{C}$ . На основании химического состава сцинтиллятора и отношения сечений захвата на этих двух ядрах ожидается, что около 99 % всех тепловых нейтронов захватывается на водороде.

Энергетический спектр событий-кандидатов на захват нейтрона и случайных совпадений, полученный с помощью КЭИК, представлен на рисунке 9а. Временное распределение захватов нейтронов представлено на рисунке 9б. Полученное из фитирования данного распределения время захвата нейтрона составило ( $\tau_n = 258.7 \pm 0.8_{\text{стат}} \pm 2.0_{\text{сист}}$ ) мкс.

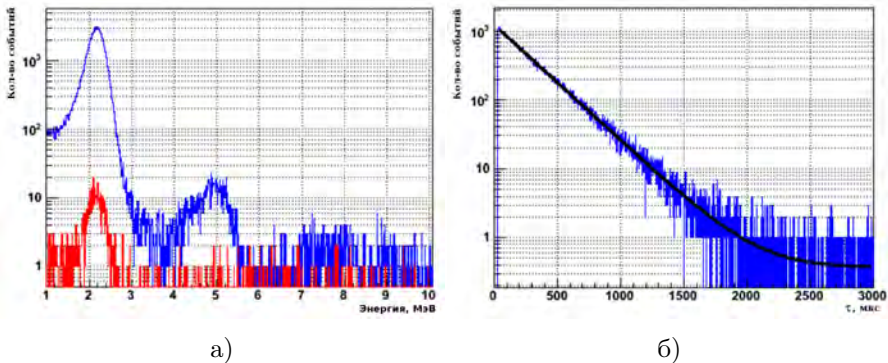


Рисунок 9 — а) Спектр  $\gamma$ -квантов от захвата космогенных нейтронов (синий) и спектр случайных совпадений (красный). б) Распределение времени между родительским мюоном и захватом нейтронов в сцинтилляторе.

Удельный выход нейтронов на единицу трека мюона в чувствительном объёме для системы КЭИК составил:

$$Y_n = \frac{N_n}{N_\mu} \cdot \frac{1}{l_\mu^{avg}} \cdot \frac{1}{\rho_{scint}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{det} \cdot \varepsilon_{t \cdot vol}} = (2.87 \pm 0.07_{\text{стат}} \pm 0.15_{\text{сист}}) \cdot 10^{-4} n / (\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2)), \quad (1)$$

$l_\mu^{avg}$  - средний путь мюона сквозь внутренний объём детектора и  $\rho_{scint} = 0.88 \text{ г}/\text{см}^3$  - плотность сцинтиллятора.

В реакциях мюонного скалывания помимо нейтронов образуются радиоактивные ядра. С помощью КЭИК изучалась скорость наработки ядер  $^{12}\text{B}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^9\text{Li}$ . Полученные значения удельных выходов и их сравнение с результатами экспериментов KamLAND и LVD представлены в таблице 2. Результаты находятся в согласии с данными других экспериментов, что говорит о надёжности измерений, проводимых с помощью созданной системы.

Таблица 2 — Сопоставление результатов измерений удельного выхода космогенных элементов в Борексино с результатами LVD и KamLAND.

	Удельный выход шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$		
	Борексино	KamLAND	LVD
$n$	$(2.87 \pm 0.17) \cdot 10^{-4}$	$(2.79 \pm 0.31) \cdot 10^{-4}$	$(3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$
$^{12}\text{N}$	$< 1.1 \cdot 10^{-7}$	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$	—
$^{12}\text{B}$	$(56 \pm 3) \cdot 10^{-7}$	$(42.9 \pm 3.3) \cdot 10^{-7}$	—
$^8\text{He}$	$< 1.5 \cdot 10^{-7}$	$(0.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$	—
$^9\text{Li}$	$(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$	$(2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-7}$	—

Полученные данные о космогенных фонах в детекторе могут быть использованы для выделения нейтринного сигнала из общего потока данных в таких задачах, как регистрация CNO-нейтрино, измерение потока гео-нейтрино и других низкостатистических и чувствительных к уровню фона задачам.

В **заключении** приведены основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Разработан и реализован в составе экспериментальной платформы Борексино уникальный электронно-измерительный комплекс на основе быстрых преобразователей формы импульса с гибкой триггерной системой (КЭИК), оптимизированный для регистрации нейтринного излучения от астрофизических источников.
2. Реализованы алгоритмы оффлайн-анализа данных от комплекса, включающие в себя поиск событий в данных КЭИК, оценку их энерговыделения в детекторе и идентификацию мюонных, сцинтилляционных и шумовых событий.
3. Реализована интеграция данных КЭИК в единую структуру анализа Борексино, что позволило проводить комплексный анализ, используя данные от нескольких подсистем Борексино.
4. С помощью системы КЭИК были произведены измерения и получены новые результаты о частоте рождения космогенных радиоактивных элементов  $^{12}\text{B}$  (удельный выход  $Y_{^{12}\text{B}} = (55.6 \pm 2.5_{\text{стат}} \pm 2.1_{\text{сист}})10^{-7}$  шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$ ),  $^{12}\text{N}$  ( $Y_{^{12}\text{N}} < 1.1 \cdot 10^{-7}$  шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$ ),  $^8\text{He}$  ( $Y_{^8\text{He}} < 0.042 \cdot 10^{-7}$  шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$ ),  $^9\text{Li}$  ( $Y_{^9\text{Li}} = (2.9 \pm 0.3)10^{-7}$  шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$ ) при взаимодействии космических мюонов с жидким органическим сцинтиллятором на основе псевдокумола на глубине 3800 м водного эквивалента.
5. Были получены новые результаты о наработке космогенных нейтронов ( $Y_n = 2.87 \pm 0.07_{\text{стат}} \pm 0.15_{\text{сист}} \cdot 10^{-4} n / (\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$ ) и средней кратности их рождения ( $\bar{M} = 3.61 \pm 0.08_{\text{стат}} \pm 0.07_{\text{сист}} n / \mu$ ) при взаимодействии космических мюонов с жидким органическим

сцинтиллятором на основе псевдокумола на глубине 3800 м водного эквивалента.

Экспериментальные результаты были получены при помощи сверхнизкофонового жидко-сцинтилляционного детектора Борексина, созданного в рамках международного проекта с участием НИЦ «Курчатовский институт» и расположенного в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия). Разработанные в работе методики были применены коллаборацией Борексина при поиске низкоэнергетических нейтрино от космических гамма-всплесков [17]. Дальнейший анализ данных КЭИК даст возможность решать широкий круг задач нейтринной астрофизики, при этом результаты измерений параметров наработки космогенных элементов позволят исключать их влияние при проведении низкостатистического анализа. Архитектура комплекса и программные алгоритмы, разработанные в настоящей работе, могут быть использованы при построении систем сбора данных будущих нейтринных детекторов и детекторов тёмной материи.

## Список литературы

1. The  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  reaction, solar neutrinos and the age of the globular clusters / S. Degl'Innocenti [et al.] // *Physics Letters B*. — 2004. — Vol. 590, 1–2. — P. 13–20.
2. *Serenelli A.* Alive and well: A short review about standard solar models // *The European Physical Journal A*. — 2016. — Vol. 52, no. 4. — P. 78.
3. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / K. Hirata [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1987. — Vol. 58, issue 14. — P. 1490–1493.
4. О возможной регистрации нейтринного сигнала 23 февраля 1987 года на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе ИЯИ АН СССР / Е. Алексеев [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. — 1987. — Т. 45, вып. 10. — С. 461–464.
5. Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud / R. M. Bionta [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1987. — Vol. 58, issue 14. — P. 1494–1496.
6. Neutrino observations from supernova 1987A / M. Aglietta [et al.] // *Helv. Phys. Acta*. — 1987. — Vol. 60. — P. 619–628.
7. *Halzen F., Jaczko G.* Signatures of  $\gamma$  ray bursts in neutrino telescopes // *Phys. Rev. D*. — 1996. — Vol. 54, issue 4. — P. 2779–2783.
8. *Berezinsky V. S., Castagnoli C., Galeotti P.* High-energy neutrino astronomy with «small» underground detectors // *Il Nuovo Cimento C*. — 1985. — Vol. 8, no. 3. — P. 185–211.
9. *Grevesse N., Sauval A.* Standard Solar Composition // *Space Science Reviews*. — 1998. — Vol. 85, no. 1. — P. 161–174.
10. The Chemical Composition of the Sun / M. Asplund [et al.] // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2009. — Vol. 47, no. 1. — P. 481–522.
11. Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy / G. Bellini [et al.] // *Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*. — 2014. — Vol. 89, no. 11. — 112007.
12. Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun / G. Bellini [et al.] // *Nature*. — 2014. — Vol. 512, no. 7515. — P. 383–386.
13. Measurement of the solar  $^8\text{B}$  neutrino rate with a liquid scintillator target and 3 MeV energy threshold in the Borexino detector / G. Bellini [et al.] // *Phys. Rev. D*. — 2010. — Vol. 82, issue 3. — 033006.
14. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2009. — Vol. 600, no. 3. — P. 568–593.

15. Cosmic-muon flux and annual modulation in Borexino at 3800 m water-equivalent depth / G. Bellini [et al.] // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2012. — Vol. 2012, no. 5. — 015.
16. Measurement of the residual energy of muons in the Gran Sasso underground laboratories / M. Ambrosio [et al.] // *Astroparticle Physics*. — 2003. — Vol. 19, no. 3. — P. 313–328.
17. Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts / M. Agostini [et al.] // *Astroparticle Physics*. — 2017. — Vol. 86. — P. 11–17.



*Лукьянченко Георгий Александрович*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ БЫСТРЫХ  
ОЦИФРОВЩИКОВ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА В СОСТАВЕ ДЕТЕКТОРА  
БОРЕКСИНО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ  
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

