

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

На правах рукописи

АБДУРАШИТОВ  
Джонрид Нариманович

# Низкофоновый спектрометр быстрых нейтронов

специальность 01.04.01 — приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2008

Работа выполнена в Лаборатории радиохимических методов детектирования нейтрино Отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики Института ядерных исследований Российской академии наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук

В.Н.Гаврин

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук

С.П.Михеев

доктор физико-математических наук

А.Г.Долголенко

**Ведущая организация:**

Государственный научный центр Российской Федерации - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского (ГНЦ РФ — ФЭИ)

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_\_ час.

на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Института ядерных исследований РАН по адресу: Москва, проспект 60летия Октября, д. 7а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных исследований РАН

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

Б.А.Тулупов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Цель работы.** Целью работы является изложение и защита методики, разработанной для измерения плотности потока и энергетического распределения быстрых нейтронов на уровне  $10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и ниже в области энергий 1–25 МэВ с использованием низкофонового спектрометра быстрых нейтронов.

**Актуальность работы.** В последние десятилетия бурное развитие получили масштабные неускорительные эксперименты по исследованию свойств нейтрино, по поиску частиц темной материи и процесса двойного безнейтринного  $\beta$ -распада. В этих экспериментах имеют дело с очень редкими событиями, так что их невозможно проводить на поверхности земли по причине мощного фона космических лучей. За последние 40 лет было построено несколько крупных подземных лабораторий. Среди самых известных можно перечислить многоцелевые детекторы шахты Камиока в Японии, лабораторию Гран-Сассо в автомобильном тоннеле в Италии, никелевую шахту в местечке Садбэри, Канада, а также Баксанскую нейтринную обсерваторию, расположенную в горах Северного Кавказа в России. Все они расположены на глубине в несколько тысяч метров водного эквивалента, обеспечивающей подавление потока мюонов космических лучей в миллиарды раз. На такой глубине существенным становится фон окружающих горных пород, в частности, ультранизкий поток быстрых нейтронов. Планирование чувствительного подземного эксперимента и интерпретация его результатов невозможна без учета вклада фоновых быстрых нейтронов в полезный сигнал. В настоящей диссертации представлены прибор и методика, позволяющие с высокой точностью измерить фон быстрых нейтронов от горных пород.

**Новизна работы.** Предлагаемая методика измерения ультранизких потоков быстрых нейтронов впервые разработана и использована в применении к условиям подземных помеще-

ний глубокого заложения. Впервые измерены плотность потока и энергетическое распределение фоновых быстрых нейтронов в подземных лабораториях Баксанской нейтринной обсерватории.

**Существенный личный вклад** диссертанта в представляемую работу не вызывает сомнений и заключается в следующем. Абдурашитов Д.Н. совместно с Янцем В.Э. принял участие в изготовлении и сборке отдельных элементов детекторной части спектрометра. Абдурашитов совместно с соавторами Шихиным А.А. и Калиховым А.В. принял непосредственное активное участие в разработке концепции системы регистрации, основанной на двухканальном цифровом осциллокопе, и соответствующего программного обеспечения. Абдурашитов лично разработал оригинальный алгоритм записи кадров совпадающих событий в режимах измерений и калибровки; алгоритм позволяет измерять собственный фон детектора и фон случайных совпадений одновременно с измерением нейтронного сигнала. Абдурашитов лично разработал методику обработки и статистического анализа данных измерений. Непосредственное участие Абдурашитов совместно с Матушко А.В. принял в разработке алгоритма компьютерного моделирования, в результате которого получены функция отклика и эффективность детектора. Все измерения, представленные в диссертации, проведены под общим научным руководством и с прямым участием Абдурашитова. Кроме того, Абдурашитовым лично обработаны данные всех измерений, представленных в диссертации, проведен статистический их анализ и оформлены результаты.

### **Практическая и научная ценность работы.**

1. Простая и эффективная методика, предлагаемая в данной работе, позволяет измерить плотность потока и спектр

быстрых нейтронов на уровне  $10^{-7}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и ниже в области энергий 1–25 МэВ в условиях подземных помещений с минимальными дополнительными средствами подавления  $\gamma$ -фона.

2. Высокая эффективность регистрации детектора, составляющая  $\sim 10\%$  в области 1–10 МэВ, позволяет проводить измерения фона быстрых нейтронов за относительно короткий промежуток времени (1–2 недели).
3. Принципиальной отличительной особенностью методики является способность к измерению фона детектора одновременно с измерением сигнала быстрых нейтронов.
4. Другой принципиальной отличительной особенностью методики является способность к измерению плотности потока подпороговых (0–1 МэВ) нейтронов одновременно с измерением сигнала быстрых нейтронов.
5. Разработанная методика может быть применена для проведения долговременного мониторинга быстрых нейтронов в низкофоновых экспериментах, а также для паспортизации подземных помещений.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Разработан, изготовлен и успешно испытан низкофоновый детектор быстрых нейтронов на основе жидкого органического сцинтиллятора в комбинации с гелиевыми пропорциональными счетчиками.
2. Разработана и успешно испытана простая и эффективная методика измерения сверхнизких потоков быстрых нейтронов в подземных условиях.

3. Проведены измерения сверхнизких потоков быстрых нейтронов в подземном комплексе Галлий-Германиевого Нейтринного Телескопа (ГГНТ) и в НизкоФоновой Лаборатории Глубокого Заложения (НФЛГЗ) Баксанской нейтринной обсерватории (БНО), Приэльбрусье, а также в помещениях проекта SUPP в шахте Пихасалми, Финляндия.
4. Показано, что на основе комбинации жидкого органического сцинтиллятора с гелиевыми счетчиками и с использованием разработанной методики возможно планирование долговременного мониторинга быстрых нейтронов в низкофоновых экспериментах, а также паспортизация подземных помещений.

**Апробация работы.** Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Баксанских школах «Частицы и космология» (1999, 2001); на конференциях NANP и NANPINO (ОИЯИ, Дубна, 1999, 2000); на конференции «NEUSPEC 2000» (Италия, 2000); на конференции «TAUP 2001» (Италия, 2001) на семинарах в БНО (Приэльбрусье, п. Нейтрино), ФИАН (Москва), ИЯИ (Москва).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 82 страницах, включая 26 рисунков, 7 таблиц и список литературы, содержащий 90 наименований. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы.

**Введение** содержит обзор теоретической мотивации и современного состояния исследований фундаментальной физики, проводимых в подземных лабораториях. На примере распада протона показано, что при поиске столь редкого события требуется значительное подавление фона космических лучей, в первую очередь, за счет проведения экспериментов глубоко под

землей. В самом общем виде дана характеристика источников естественного радиоактивного фона в подземных лабораториях глубокого заложения. В первом приближении показан существенный вклад быстрых нейтронов в общий радиоактивный фон и одновременно указано на принципиальные трудности измерений ультранизких потоков фоновых быстрых нейтронов.

Формулируются основные цели и задачи, решаемые в диссертации. Перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведено краткое описание последующих глав.

**В главе 1** приводится описание фундаментальных экспериментов подземной физики, в которых фон быстрых нейтронов играет значительную роль. В разделе 1.1 изложены современные представления о феномене темной материи во Вселенной. В параграфе 1.1.1 рассмотрены свидетельства существования темной материи, в параграфе 1.1.2 приведены различные гипотезы о составляющих ее элементах. Раздел 1.2 представляет собой обзор экспериментальных попыток поиска темной материи. Параграф 1.2.1 содержит описание поиска звездных массивных объектов как основной компоненты темной материи в Галактике, в параграфе 1.2.2 описывается состояние экспериментов по поиску солнечных аксионов. Основной упор делается на подземные установки, которые заняты поиском слабовзаимодействующих массивных частиц WIMP (параграфы 1.2.3 и 1.2.4) и для которых фон быстрых нейтронов представляет существенную опасность. В разделе 1.3 кратко излагаются теоретические обоснования процесса двойного безнейтринного  $\beta$ -распада, раздел 1.4 содержит обзор современных подземных экспериментов по его поиску.

**В главе 2** в общем виде рассмотрена проблема фона быстрых нейтронов в подземных лабораториях. В первую очередь, в разделе 2.1 перечислены основные источники быстрых нейтронов глубоко под землей с краткой характеристикой их

интенсивности и спектра. В параграфе 2.1.1 охарактеризована генерация нейтронов мюонами космических лучей. Параграф 2.1.2 описывает потоки нейтронов деления ядер U-Th радиоактивных рядов, содержащихся в горных породах. В параграфе 2.1.3 излагается процесс генерации нейтронов в  $(\alpha, n)$ -реакциях на легких элементах, в которых источником  $\alpha$ -частиц служат те же ядра уран-ториевых рядов. Сравнение ожидаемых значений плотности потока фоновых нейтронов от различных источников приводит к выводу о том, что на больших глубинах (1000 м.в.э и глубже) основной вклад в поток дают делительные нейтроны и нейтроны от  $(\alpha, n)$ -реакций. В разделе 2.2 приводится обзор современного состояния экспериментальных попыток измерения фона быстрых нейтронов на уровне  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> в области энергий 1–25 МэВ в различных подземных лабораториях. В параграфе 2.2.1 описывается радиохимический эксперимент по измерению фона быстрых нейтронов с использованием пороговой реакции  $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ , идущей при энергиях нейтронов выше 3 МэВ. Мишенью в этой работе служил обезвоженный щавелевокислый кальций  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ . Измеряя скорость распада  $^{37}\text{Ar}$ , извлекаемого из мишени после экспозиции фоновыми нейтронами, можно судить о потоке нейтронов в месте расположения детектора. Достоинством такого способа измерения является нечувствительность к внешнему  $\gamma$ -фону в широких пределах, недостаток - отсутствие информации о спектре. В параграфе 2.2.2 дается описание эксперимента по измерению нейтронного фона посредством нескольких пропорциональных счетчиков, заполненных  $^3\text{He}$  и помещенных в органический замедлитель. Несмотря на относительную простоту методики, очевидным ее недостатком является полное отсутствие прямой информации о спектре быстрых нейтронов. Авторы работы оценивают область чувствительности детектора как 0.5–10 МэВ. В параграфе 2.2.3 обсуждаются детекторы



на основе органических сцинтилляторов при условии полного поглощения нейтрона в объеме детектора. В этом случае мерой энергии нейтрона служит количество света, излучаемого в сцинтилляторе протонами отдачи, которые образуются в процессе замедления нейтрона. Самым серьезным ограничением этого способа измерения фона быстрых нейтронов является высокая чувствительность таких детекторов к  $\gamma$ -фону. Для подавления  $\gamma$ -фона, в свою очередь, применяются различные средства, такие как дискриминация по форме световой вспышки. В качестве примера приводится описание детектора, состоящего из 32-х цилиндрических секций, заполненных примерно 1 л сцинтиллятора BC501A производства Vicron Corp. Каждая секция обернута кадмиевой фольгой и просматривается с обоих торцов быстрыми ФЭУ, обеспечивающими спектрометрию и дискриминацию по форме сигнала. Наличие кадмия дает возможность формировать «метку захвата» замедлившегося нейтрона по реакции  $(n, \gamma)$  и, тем самым, выделять события с полным поглощением нейтрона в детекторе среди множества прочих событий. В этом случае быстрый нейтрон оставляет уникальную сигнатуру в виде двух совпадающих в течение нескольких десятков мкс сигналов ФЭУ — замедление в сцинтилляторе и захват ядрами кадмия. Авторы детектора оценивают область чувствительности как 1–10 МэВ. В качестве недостатка можно отметить длительное время набора статистики и необходимость пассивной защиты. В параграфе 2.2.4 приводится другой способ формирования «метки захвата» замедлившегося нейтрона, реализованный путем введения в органический сцинтиллятор добавки в виде растворимого соединения  ${}^6\text{Li}$ . Один из примеров — измерение нейтронного фона с применением жидкого сцинтиллятора типа NE-320 объемом 8 л ( $10 \times 10 \times 80$  см) с небольшой добавкой  ${}^6\text{Li}$ . В этом случае уникальной сигнатурой служат два совпадающих в течение 1–

50 мкс сигнала ФЭУ — замедление и захват на  ${}^6\text{Li}$ . Недостатки этого детектора те же — длительное время набора статистики и необходимость пассивной защиты. В разделе 2.3 результаты измерений фона быстрых нейтронов, проведенных указанными способами в различных подземных лабораториях, сведены в одну таблицу.

**Глава 3** представляет собой описание спектрометра быстрых нейтронов, разработанного и изготовленного в ИЯИ РАН. В разделе 3.1 поясняется конструкция детекторной части спектрометра, которая состоит из жидкого органического сцинтиллятора, просматриваемого тремя фотоумножителями (ФЭУ), и девятнадцати пропорциональных счетчиков, наполненных  ${}^3\text{He}$  (нейтронные счетчики - НС) и распределенных равномерно по объему сцинтиллятора. Корпус детектора выполнен из нержавеющей стали. Объем цилиндрического бака (360x360 мм), заполненного сцинтиллятором, составляет около 30 л. Для увеличения светосбора стенки и дно сцинтилляционного бака армированы тефлоном. Каждый счетчик внутри бака армирован также алюминиевой фольгой. Иллюминатор выполнен из органического стекла и накрыт пластиной из тефлона с окнами, предназначенными для улучшения светосбора и крепления фотоумножителей. Раздел 3.2 описывает принцип действия детектора. Быстрые нейтроны ( $>1$  МэВ), попадая в сцинтиллятор, замедляются до тепловой энергии и диффундируют внутри детектора до тех пор, пока не захватятся нейтронным счетчиком или протонами сцинтиллятора, или покинут детектор. Интенсивность световой вспышки от совокупности протонов отдачи, производимых во время замедления нейтрона, в среднем пропорциональна начальной энергии нейтрона. Часть замедленных нейтронов захватывается ядрами  ${}^3\text{He}$  в нейтронных счетчиках, которые излучают заряженные частицы посредством реакции  ${}^3\text{He}(n,p)t$ ,  $E_p=574$  кэВ,  $E_t=191$  кэВ. Таким

образом, сигнатура подобного события представляет собой световую вспышку в сцинтилляторе, сопровождаемую захватом в нейтронном счетчике через некоторое время задержки. Эта задержка обусловлена средним временем жизни замедленного нейтрона внутри детектора и определяется, главным образом, его конструкцией. В частности, для данного детектора  $T_{1/2}$  составляет  $\sim 50$  мкс. В разделе 3.3 приводится описание системы регистрации. С целью упрощения сигналы от всех ФЭУ и НС объединены в два независимых канала, названных «канал ФЭУ» и «канал НС» соответственно. Схемные решения малосигнальной электроники выбраны с учетом достижения оптимального соотношения сигнал/шум. Для уменьшения шумов основное усиление первичных сигналов производится предусилителями до их объединения. Сигнал в канале НС служит триггером в основном режиме работы системы — измерения фона быстрых нейтронов. Базовым элементом системы регистрации является двухканальный цифровой осциллоскоп ЛА-н10М5 (100 МГц, 8 бит) с интерфейсом РС/АТ, выпускаемый российской компанией «Руднев-Шилаев». Полная форма импульсов событий в каналах ФЭУ и НС записывается одновременно в каждом канале осциллоскопа. Кадр записывается в выбранном временном интервале, включающем периоды до и после триггера, которые называются предыстория и история соответственно. Этот временной интервал может быть подстроен с помощью алгоритма сбора в широком интервале (от 2 мкс до 2 мс). Обычно момент времени срабатывания триггера, которому соответствует захват в нейтронном  $^3\text{He}$  счетчике, устанавливается в середину кадра осциллоскопа  $[-160; +160]$  мкс. Таким образом, быстрое событие ФЭУ, коррелированное с отсчетом  $^3\text{He}$ , должно произойти до него в интервале  $[-160; 0]$  мкс, а некоррелированное событие ФЭУ может произойти с одинаковой вероятностью в любом месте кадра. Раздел 3.4 характе-

ризует чувствительные элементы спектрометра. Жидкий сцинтиллятор аналогичен NE-213 и имеет плотность  $0.84 \text{ г/см}^3$ , концентрацию водорода  $136 \text{ г/кг}$ , длительность переднего фронта вспышки  $3 \text{ нс}$ , световыход не менее  $40\%$  от антрацена и температуру воспламенения  $80^\circ\text{C}$ . Сцинтиллятор просматривается тремя фотоумножителями ФЭУ-173 производства завода «Экран», Новосибирск. В качестве захватчика тепловых нейтронов в детекторе применены нейтронные счетчики СМ-18 промышленного производства. Десять счетчиков с размерами  $30 \times 300 \text{ мм}$  заполнены смесью  $^3\text{He} + 4\% \text{ Ag}$  под давлением  $4 \text{ атм}$  и смонтированы в изолированных колодцах во внутреннем объеме бака. В разделе 3.5 дается описание методики расчета эффективности регистрации детектора, в которую входят две величины. Вероятность такого исхода, когда нейтрон в процессе замедления остается в геометрических пределах детектора, зависит от первоначальной энергии нейтрона. Вероятность захвата нейтронов, замедлившихся и оставшихся в объеме детектора, в гелиевых счетчиков практически не зависит от исходной энергии нейтрона и составляет  $\epsilon_{\text{захв}} = (20 \pm 1)\%$ . В разделе 3.6 излагается методика калибровки энергетических шкал в каналах НС (параграф 3.6.1) и ФЭУ (параграф 3.6.2). Канал НС калибруется источником нейтронов Pu-Be, канал ФЭУ - источником  $^{60}\text{Co}$ . Дается пересчет значений энергий электронной шкалы в истинную энергию нейтрона в канале ФЭУ. Указываются два режима измерений, отличающихся различным диапазоном энергий нейтрона в зависимости от усиления в канале ФЭУ:  $1.5\text{-}12.0 \text{ МэВ}$  и  $12\text{-}25 \text{ МэВ}$ . Параграф 3.6.3 описывает связь совпадающих событий в каналах НС и ФЭУ при облучении детектора источником быстрых нейтронов Pu-Be. Показывается, что время жизни нейтрона в объеме детектора после замедления до захвата на  $^3\text{He}$  составляет  $T_{1/2} = 50 \pm 2 \text{ мкс}$ . Раздел 3.7 содержит характеристики и при-

меры всевозможных событий, записываемых в файлы данных в процессе измерений. Подробное описание алгоритма обработки данных и выявления сигнала быстрых нейтронов приведено в разделе 3.8.

**Глава 4** содержит описание измерений фона быстрых нейтронов, проведенных в некоторых подземных лабораториях с использованием этого спектрометра. В разделе 4.1 дается описание измерений нейтронного фона в подземных помещениях Баксанской нейтринной обсерватории в Приэльбрусье. Показано, что скорость счета и энергетический спектр коррелированных событий незащищенного детектора в камере ГГНТ практически совпадают с собственным фоном. Это приводит к оценке верхней границы плотности потока быстрых нейтронов в ГГНТ, которая оказывается меньше  $1.4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  выше 1 МэВ. В то же время в открытой горной выработке скорость коррелированных событий за вычетом собственного фона составила  $(1.4 \pm 0.3) \text{ час}^{-1}$ , что соответствует плотности потока  $(7.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  выше 1 МэВ. Раздел 4.2 содержит описание измерений фона нейтронов на различных уровнях шахты Пихасалми в Финляндии. В этом же разделе в качестве примера подробно разбирается один набор данных с последующей его обработкой. Показано, что в процессе измерений даже без применения специальных методов подавления  $\gamma$ -фона (например, дискриминации по форме световой вспышки) в отклике детектора отчетливо просматривается сигнал быстрых нейтронов. Демонстрируется возможность измерения плотности потока нейтронов с энергиями ниже порога регистрации в канале ФЭУ, что в данных измерениях соответствует 1.5 МэВ протона отдачи. В интервале энергий от 1.5 до 12.0 МэВ плотность потока нейтронов на различных уровнях шахты лежит в диапазоне  $(5-16) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Плотность потока нейтронов с энергиями 0–1.5 МэВ колеблется в пределах  $(26-42) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Статистическая неопределенность результатов составляет около 10%.

**В последней главе 5** результаты измерений обсуждаются с точки зрения методических особенностей. Вводится понятие удельного сечения, определяемое как усредненное на определенном интервале энергий быстрых нейтронов сечение детектора, приведенное к единице массы чувствительной среды. При таком определении удельное сечение совокупно характеризует чувствительность детектора к быстрым нейтронам и к фону. Показывается, что по этому ключевому параметру детектор ИЯИ превосходит имеющиеся в мире аналоги более чем на порядок. Это приводит к тому, что при плотности потока фоновых быстрых нейтронов порядка  $10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  скорость счета детектора оказывается  $\sim 1 \text{ час}^{-1}$  и выше, в то время как у других детекторов в лучшем случае она составляет  $\sim 1 \text{ сут}^{-1}$ .

**В заключении** приводятся основные выводы и положения диссертации, выносимые на защиту.

### **Основные результаты, полученные в диссертации:**

1. Разработан, изготовлен и успешно испытан сверхнизкофоновый детектор быстрых нейтронов на основе жидкого органического сцинтиллятора в комбинации с гелиевыми пропорциональными счетчиками. Высокая эффективность регистрации детектора, составляющая  $\sim 10\%$  в области 1–10 МэВ, позволяет проводить измерения фона быстрых нейтронов за относительно короткий промежуток времени (1–2 недели). Показано, что по значению удельного сечения, совокупно характеризующего чувствительность детектора к быстрым нейтронам и к фону, детектор на порядок и более превосходит лучшие мировые аналоги.

2. Разработана и успешно испытана простая и эффективная методика измерения сверхнизких потоков быстрых нейтронов. Методика позволяет измерить плотность потока и спектр быстрых нейтронов на уровне  $10^{-7}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и ниже в области энергий 1–25 МэВ в условиях подземных помещений с минимальными дополнительными средствами подавления  $\gamma$ -фона. Принципиальной отличительной особенностью методики является способность к измерению фона детектора одновременно с измерением сигнала быстрых нейтронов. Другой особенностью методики является способность к измерению плотности потока подпороговых (0–1 МэВ) нейтронов одновременно с измерением сигнала быстрых нейтронов.
3. Проведены измерения сверхнизких потоков быстрых нейтронов в подземном комплексе Галлий-Германиевого Нейтринного Телескопа (ГГНТ) и в НизкоФоновой Лаборатории Глубокого Заложения (НФЛГЗ) Баксанской нейтринной обсерватории (БНО), Приэльбрусье, а также в помещениях проекта SUPP в шахте Пихасалми, Финляндия. Показано, что за относительно короткое время отдельного измерения (10–20 суток) при плотности потока быстрых нейтронов порядка  $10^{-7}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и ниже в области энергий 1–25 МэВ в условиях подземных помещений с минимальными дополнительными средствами подавления  $\gamma$ -фона статистическая обеспеченность результатов измерений оказывается на уровне 10%.
4. Показано, что на основе комбинации жидкого органического сцинтиллятора с гелиевыми счетчиками и с использованием разработанной методики возможно планирование долговременного мониторинга быстрых нейтронов в

низкофоновых экспериментах, а также паспортизация подземных помещений.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Д.Н. Абдурашитов, В.Н. Гаврин, Г.Д. Ефимов *и др.*, «Спектрометр быстрых нейтронов», Приб. и техн. эксп. **6** (1997), 5
2. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, A.V. Kalikhov *et al.*, «Events registration in a fast neutrons spectrometer», X-th International School PARTICLES and COSMOLOGY, Apr. 1999
3. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, A.V. Kalikhov *et al.*, «Fast Neutron Flux Measurements in the Underground Facilities at Baksan», in Proceed. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Non-Accelerator New Physics (NANP-99), Dubna, Russia; опубли. в Яд. Физ. **63** (2000), 1349
4. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, A.V. Kalikhov *et al.*, «High-sensitive spectrometer of fast neutrons and the results of fast neutron background flux measurements at the gallium-germanium solar neutrino experiment (SAGE)», in Proceed. of the Int. Workshop on Non-Accelerator New Physics in Neutrino Observations (NANPINO-2000), Dubna, Russia; publ. in Part. and Nucl. Lett. **6[109]** (2001), 53
5. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, A.V. Kalikhov *et al.*, «Measurement of fast neutron background in SAGE», in Proceed. of the 7<sup>th</sup> Int. Workshop on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP-2001), Gran-Sasso, Italy; publ. in Nucl. Phys. **B 110** (2002), 320



6. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, A.V. Kalikhov *et al.*, «High-sensitive spectrometer of fast neutrons and the results of fast neutron background flux measurements», in Proceed. of the Int. Workshop on Neutron Field Spectrometry in Science, Technology and Radiation Protection (NEUSPEC 2000), Pisa, Italy; publ. in NIM **A 476** (2002), 322
7. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, V.L. Matushko *et al.*, «Measurement of Neutron Background at the Pyhäsalmi mine for CUPP Project, Finland», submitted to Nucl. Instr. and Meth.; see also nucl-ex/0607024