

НОВАЯ НИЗКОФОНОВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ В ШАХТЕ ПЮХАСАЛМИ (ФИНЛЯНДИЯ)

*Л. Б. Безруков*¹, *А. Виркаярви*², *Т. Енквист*²,
*Я. Йоутсенваара*², *В. В. Казалов*¹, *С. Д. Крохалева*¹,
*Й. Кутунива*², *П. Куусиниеми*², *К. Лоо*³,
Б. К. Лубсандоржиев^{1,*}, *С. Б. Лубсандоржиев*¹, *Дж. Миситано*³,
*А. Ю. Сидоренков*¹, *М. Слупецки*³, *В. Тржаска*³, *Н. А. Ушаков*¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Университет Оулу, Пюхасалми, Финляндия

³ Университет Ювяскюля, Финляндия

Новая низкофоновая лаборатория была пущена в строй в шахте Пюхасалми в Центральной Финляндии в начале 2017 г. Лаборатория расположена на глубине 1436 м, что соответствует ~ 4100 м водного эквивалента (м в.э.). В статье описаны оборудование и низкофоновые условия лаборатории — уровень радиоактивного фона от окружающей породы и поток мюонов космических лучей на глубине лаборатории. Кратко описываются специализированные установки, разработанные для проведения низкофоновых измерений с высокой чувствительностью.

A new low background laboratory started to operate in the Puhäsalmi mine in the Central Finland in the beginning of 2017. The laboratory is located at the depth of 1436 meters corresponding to ~ 4100 m of water equivalent (m w.e.). In this paper the existing facility and low background conditions of the laboratory (radioactive background due to surrounding rocks and flux of cosmic ray muons) are presented. We describe briefly a dedicated set-ups developed for low background measurements with high sensitivity.

PACS: 29.40.Mc; 85.60.Dw; 95.85.Ry

ВВЕДЕНИЕ

Шахта Пюхасалми расположена в Центральной Финляндии. Максимальная глубина шахты 1440 м, что соответствует более 4100 м в.э. В самой шахте и вокруг нее существует хорошо развитая инфраструктура. Высокого

*E-mail: lubsand@rambler.ru



Рис. 1. Географическое месторасположение шахты Пюхасалми (*а*) и ее вертикальный разрез (*б*)

качества шоссе и сети железных дорог связывают шахту с международными аэропортами, расположенными в Хельсинки и Оулу. Географическое расположение и вертикальный разрез шахты представлены на рис. 1, *а* и *б* соответственно. Самой глубокой точки шахты можно достичь на тяжелом грузовом автомобиле за менее чем 30 мин, используя 11-км дорогу в штольнях шахты, или за 3 мин с помощью скоростного мощного лифта, способного транспортировать ~ 21 т породы или 20 человек. В самой глубокой части шахты также существуют системы связи высокого качества, включая оптоволоконные линии связи и сеть мобильной телефонной связи.

Все вышесказанное делает шахту весьма привлекательным местом для размещения крупномасштабных экспериментов по астрофизике частиц, в частности, нейтринных экспериментов. И действительно, шахта Пюхасалми уже активно обсуждалась в связи с рядом таких экспериментов, как LAGUNA — нейтринный эксперимент с длинной базой и LENA — многоцелевой комплексный эксперимент с нейтрино низких энергий.

В настоящее время коллаборация, состоящая из нескольких финских и российских университетов и институтов, активно работает в разработанном и созданном ими эксперименте ЕММА [1, 2]. Данный эксперимент проводится в шахте Пюхасалми на относительно небольшой глубине 85 м (~ 240 м в.э.). В этом эксперименте измеряется множественность мюонов, рожденных в широких атмосферных ливнях, для того чтобы исследовать массовый состав первичного космического излучения в области энергий вокруг излома его спектра (так называемого колена) при $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ.

1. НОВАЯ НИЗКОФОНОВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ В ШАХТЕ ПЮХАСАЛМИ

Параллельно с проведением эксперимента ЕММА несколько лет назад нами была начата разработка низкофоновой лаборатории на месте большой выработки на глубине 1436 м (~ 4100 м в.э.). Эта лаборатория снабжена вентиляцией, электричеством и связана с лабораторией на поверхности с помощью оптоволоконного кабеля. Новая лаборатория показана на рис. 2.

Содержание радона в лаборатории находится на уровне меньше чем 20 Бк/м^3 . Концентрации радиоактивных изотопов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K в породе, окружающей лабораторию (в стенках), были измерены в низкофоновой лаборатории в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН и составляют:

$$^{238}\text{U} \leq (7,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-8} \text{ г/г},$$

$$^{232}\text{Th} \leq (7,6 \pm 1,5) \cdot 10^{-8} \text{ г/г},$$

$$^{40}\text{K} \leq (1,69 \pm 0,02) \cdot 10^{-7} \text{ г/г}.$$



Рис. 2. Низкофоновая лаборатория в шахте Пюхасалми

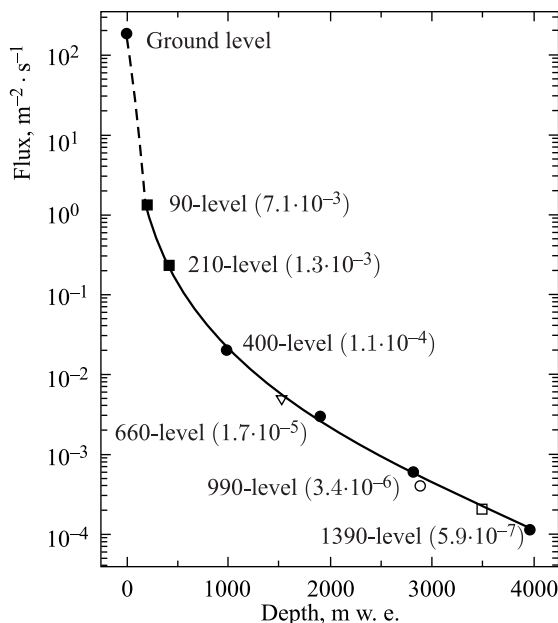


Рис. 3. Кривая поглощения мюонов, измеренная в шахте Пюхасалми [3]

Кривая поглощения мюонов, измеренная [3] на различных глубинах шахты, показана на рис. 3. Интегральный поток мюонов на глубине 1390 м, немногим выше уровня низкофоновой лаборатории, равен

$$F = (1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Работа новой низкофоновой лаборатории началась с измерения концентрации радиоактивного изотопа ¹⁴C в жидких сцинтилляторах.

2. ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ¹⁴C/¹²C В ЖИДКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

При регистрации нейтрино низких энергий с помощью жидких сцинтилляторов ультравысокой очистки основным источником фона выступает радиоактивный изотоп углерода ¹⁴C. Концентрация данного изотопа в низкофоновых жидких сцинтилляторах была измерена в ряде специализированных экспериментов, результаты которых показаны в таблице. Сцинтилляторы, использовавшиеся в этих экспериментах, были созданы на основе активно применяющихся до последнего времени ароматических органических растворителей, таких как РС (псевдокумен, C₉H₁₂), РХЕ (фенилсилилэтан, C₁₆H₁₈)

Концентрация ^{14}C , $\times 10^{-18}$	Жидкий сцинтиллятор и флуорент	Эксперимент	Ссылка
1,94 ± 0,09	PC + PPO	Borexino CTF	[4]
9,1 ± 0,4	PXE + p-Tr + β -MSB	Borexino CTF	[5]
3,98 ± 0,94	PC-додекан + PPO	KamLAND	[6]
12,6 ± 0,4	PXE + PPO	Специализированная установка	[7]

и смеси псевдокумена и додекана ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$). Однако до сегодняшнего дня нет измерений концентрации ^{14}C в набравшем популярность жидком сцинтилляторе на основе LAB (линейный алкилбензол, $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$, $n = 10-16$). Актуальность проведения таких измерений диктуется тем, что во многих широкомасштабных экспериментах используется жидкий сцинтиллятор на основе LAB, например, SNO+ и JUNO.

Максимальная энергия (Q_β) электронов, рождающихся в результате β -распада ядра ^{14}C , составляет 156 кэВ. Поэтому при попытке понижения порога регистрации нейтрино до ~ 100 кэВ и ниже в фоновых событиях начинают преобладать события от распада ^{14}C . Однако даже в области больших энергий огромные массы используемого жидкого сцинтиллятора в таких экспериментах (20 кт в случае эксперимента JUNO) приводят к тому, что концентрация ^{14}C на уровне $\sim 10^{-15}$ г/г может существенно ухудшать чувствительность таких экспериментов из-за эффекта наложений импульсов. Например, в эксперименте Borexino в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии в значении скорости счета триггерных событий преобладают события от распада ^{14}C , тогда как концентрация ^{14}C в сцинтилляторе эксперимента крайне мала и составляет $\sim 2 \cdot 10^{-18}$ г/г).

Исходя из существующих данных по измерениям концентрации изотопа ^{14}C в жидких сцинтилляторах, произведенных из нефти и газа, добытых из старых глубоких месторождений [9], можно было бы предположить, что возможна разработка жидких сцинтилляторов с существенно уменьшенной концентрацией изотопа ^{14}C при тщательном выборе месторождений углеводородов. Изотоп ^{14}C может производиться главным образом в реакциях $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. В подземных условиях нейтронный поток рождается в распадах уран-ториевых цепочек. В настоящее время начаты специализированные исследования для измерения концентрации ^{14}C в образцах нескольких жидких сцинтилляторов на базе органических растворителей, произведенных из нефти, газа и угля, добытых из различных месторождений. Целью этих исследований является поиск и обнаружение образцов сцинтилляторов с концентрацией ^{14}C , существенно меньшей чем 10^{-18} г/г. Тщательные измерения концентрации ^{14}C в жидких сцинтилляторах ведутся одновременно



Рис. 4. Элементы специализированной установки для измерения в низкофоновой лаборатории в шахте Пюхасалми концентрации изотопа ^{14}C в жидких сцинтилляторах: а) сборка установки; б) низкофоновый фотоумножитель ET9302B; в) кварцевая стеклооболочка

в низкофоновых лабораториях в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН [10] и в шахте Пюхасалми в Финляндии [11].

Методами ускорительной масс-спектропии [12] возможно измерить концентрации изотопов вплоть до 10^{-15} г/г. Для измерения меньших концентраций нами была разработана специализированная низкофоновая установка, показанная на рис. 4, а. Центральная часть этой установки состоит из двух низкофоновых фотоумножителей марки ET9302B с фотокатодами размерами 78 см (рис. 4, б), двух световодов из органического стекла и кварцевой стеклооболочки объемом 1,6 л, рис. 4, в. Стеклооболочка и световоды обернуты диэлектрической пленкой VM2000 с высоким коэффициентом отражения света. В будущем предусматривается использование фотоумножителей с высокой квантовой эффективностью, разработка которых ведется в настоящее время в ИЯИ РАН совместно с ОАО МЭЛЗ ФЭУ. Применение новых фотоумножителей позволит существенно улучшить чувствительность всей установки.

На рис. 5 показана установка, окруженная защитой от радиоактивного фона. Защита от фона, обусловленного гамма-квантами и нейтронами из окружающей породы, выполнена из слоев меди и свинца. Толщина каждого слоя 10–15 см. Предусматривается также внешний слой парафина толщиной



Рис. 5. Специализированная установка для измерения концентрации изотопа ^{14}C в жидких сцинтилляторах, собранная в низкофоновой лаборатории в шахте Пюхасалми

~ 10 см для термализации быстрых нейтронов из породы. Вся центральная часть установки продувается азотом для того, чтобы подавить фон от радона. Базовым элементом электронной системы установки является пятая версия электронного блока DRS4 evolution board (V5) [13]. Данный электронный блок основан на чипе быстрой аналоговой памяти DRS4, разработанной в Институте им. П. Шеррера (PSI). В этом блоке осуществляется оцифровка формы импульса сигналов фотоумножителей с шагом 200 пс с максимальной скоростью сэмплинга 5 гигабайт/с. Для высоковольтного питания фотоумножителей используется модуль высоковольтного напряжения питания NHQ 203M HV фирмы *iseg* (Германия).

Собственный радиоактивный фон используемых фотоумножителей, измененный также в низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН, составляет:

$$^{238}\text{U} \leq 220 \text{ мБк/ПМТ},$$

$$^{232}\text{Th} \leq 24 \text{ мБк/ПМТ},$$

$$^{40}\text{K} \leq 400 \text{ мБк/ПМТ}.$$

Органические растворители образцов жидких сцинтилляторов подвергались тщательной очистке стандартными методами с использованием колонки, наполненной оксидом алюминия (Al_2O_3). После добавки в растворители сцинтиллирующего флуорента PPO с концентрацией ~ 3 г/л производилось барботирование азотом высокой чистоты для удаления кислорода из сцинтиллятора. В настоящее время весь процесс очистки проводится в комнатных условиях, однако нами разрабатывается система, в которой очистка сцинтилляторов будет осуществляться в атмосфере азота. Энергетическая калибровка

всей установки выполняется с помощью набора радиоактивных источников (^{57}Co , ^{109}Cd , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{241}Am).

Система, состоящая из быстродействующего источника света на базе ультраярких светоизлучающих диодов и оптоволоконных кабелей, используется для калибровки усиления и чувствительности фотоумножителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая низкофоновая лаборатория начала свою работу в шахте Пюхасалми в Центральной Финляндии. Лаборатория располагается на глубине 1436 м, что соответствует ~ 4100 м в. э. В настоящее время в лаборатории ведутся измерения концентрации изотопа ^{14}C в ряде жидких сцинтилляторов на основе различных органических растворителей, произведенных разными изготовителями из нефти, газа и угля. Глубина залегания новой лаборатории, низкий уровень радиоактивности окружающей породы и хорошая инфраструктура позволяют надеяться, что место расположения лаборатории будет привлекательно для проведения широкомасштабных экспериментов в астрофизике частиц следующего поколения.

Данная работа была поддержана РФФИ (грант № 16-52-53120). Авторы выражают свою искреннюю признательность В. Ч. Лубсандоржиевой за внимательное прочтение рукописи и многочисленные ценные замечания и обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akhrameev E. A. et al. (EMMA Collab.). Multi-Pixel Geiger-Mode Avalanche Photodiode and Wavelength-Shifting Fibre-Optics Readout of Plastic Scintillator Counters for the EMMA Underground Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 610. P. 419.
2. Volchenko V. I. et al. (EMMA Collab.). Background and Muon Counting Rates in Underground Muon Measurements with a Plastic Scintillator Counter Based on a Wavelength Shifting Fibre and a Multi-pixel Avalanche Photodiode Readout // Central Eur. Phys. J. 2010. V. 8, No. 3. P. 425.
3. Enqvist T., Mattila A., Fohra V., Jamsenc T., Lehtola M., Narkilahti J., Joutsenvaara J., Nurmenniemi S., Peltoniemi J., Remes H., Sarkamo J., Shen C., Usoskin I. Measurements of Muon Flux in the Pyhäsalmi Underground Laboratory // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 554. P. 286.
4. Alimonti G. et al. (Borexino Collab.). Measurement of the ^{14}C Abundance in a Low-Background Liquid Scintillator // Phys. Lett. B. 1998. V. 422. P. 349.
5. Back H. O. et al. (Borexino Collab.). Pulse-Shape Discrimination with the Counting Test Facility // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 584. P. 48.

6. *Keefe G.* Laboratory Studies of Lead Removal from Liquid Scintillator in Preparation for KamLAND's Low Background Phase. arXiv:1102.3786[phys. ins-det].
7. *Buck C., Besida O., Cattadori C.M., Hartmann F.X., Lasserre Th., Motta D., di Vacri A., Pandola L., Schonert S., Schwan U., Барабанов И. Р., Безруков Л. Б., Данилов Н. А., Янович Е. А.* Измерение концентрации ^{14}C в жидких сцинтилляторах на установке малого объема // ПТЭ. 2012. № 1. С. 40.
8. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.).* Final Results of Borexino Phase-I Results on Low-Energy Solar Neutrino Spectroscopy // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. P. 112007.
9. *Bonvicini G., Harris N., Paolone V.* The Chemical History of ^{14}C in Deep Oilfield. arXiv:hep-ex/0308025v2.
10. *Gavriljuk Ju. M., Gangapshv A. M., Gezhaev A. M., Kazalov V. V., Kuzminov V. V., Panasenko S. I., Ratkevich S. S., Yakimenko S. P.* Working Characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory) // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 729. P. 576.
11. *Jalas P. et al. (Calliolab Collab.).* CallioLab Laboratory // Proc. of Neutrino 2016 Conf., London, 2016.
12. *Fahmi S. M., Wacker L., Synal H.-A., Szidat S.* Improving a Gas Ion Source for ^{14}C AMS // Nucl. Instr. Meth. B. 2013. V 294. P. 320.
13. <http://www.psi.ch/drs/documentation>