

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



Измерение содержания ^{14}C в жидких сцинтиляторах
с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере
в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова, Ю.М. Гаврилюк,
А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.Ю. Гришина, В.П. Заварзина, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, А.С. Курлович, Б.К. Лубсандоржиев,
С.Б. Лубсандоржиев, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова, А.М. Пшуков, В.В. Синев,
Ш.И. Умеров, Е.А. Янович, Т.Энквист, П. Куусиниemi, Й. Ютсенваара,
А. Виркайари

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1414/2015
НОЯБРЬ 2015

препринт
preprint

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



Измерение содержания ^{14}C в жидких сцинтилляторах с помощью детектора малого объема в низкофоновой камере в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова, Ю.М. Гаврилюк,
А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.Ю. Гришина, В.П. Заварзина, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, А.С. Курлович, Б.К. Лубсандоржиев,
С.Б. Лубсандоржиев, В.П. Моргалюк¹, Г.Я. Новикова, А.М. Пшуков, В.В. Синев,
Ш.И. Умеров, Е.А. Янович, Т.Энквист², П. Куусиниеми², Й. Ютсенваара²,
А. Виркайари²

¹ Институт элементоорганических соединений Российской академии наук им. А.Н. Несмеянова
(ИНЭОС РАН), Москва, Россия,

² Университет Оулу, Пихасалми, Финляндия.

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1414/2015

НОЯБРЬ 2015

МОСКВА

2015

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences
60-th October Anniversary prospect 7a,
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
проспект 60-летия Октября, 7а
Москва, 117312

Измерение содержания ^{14}C
в жидких сцинтилляторах
с помощью детектора малого объема
в низкофоновой камере
в Баксанской нейтринной обсерватории
ИЯИ РАН

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,
Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов,
В.Ю. Гришина, В.П. Заварзина, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, А.С. Курлович,
Б.К. Лубсандоржиев, С.Б. Лубсандоржиев,
В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова, А.М. Пшуков,
В.В. Синева, Ш.И. Умеров, Е.А. Янович, Т.Энквист,
П. Куусиниеми, Й. Ютсенваара, А. Виркайари

В низкофоновой лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, расположенной на глубине 4900 м.в.э., создана установка для измерения ультранизких концентраций изотопа ^{14}C в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Проведены измерения концентрации радиоуглерода ^{14}C в образцах сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола. Были использованы два метода анализа, в которых были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, усредненный результат $(3.3 \pm 0.5) \times 10^{-17}$.

Measuring of the ^{14}C low abundance
in liquid scintillator samples using small
volume detector in low background chamber
at Baksan

I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, A. V. Veresnikova,
Yu. M. Gavriilyuk, A. M. Gangapshev, V. I. Gurentsov,
V. Yu. Grishina, V. P. Zavarzina,
V. V. Kazalov, S. D. Krokhaleva, V. V. Kuz'minov,
A. S. Kurlovich, B. K. Lubsandorzhev, S. B.
Lubsandorzhev, V. P. Morgalyuk¹, G. Ya. Novikova, A.
M. Pshukov, V. V. Sinev, Sh. I. Umerov, E. A. Yanovich, T.
Enquist², P. Kuusiniemi², J. Joutsenvaara², A. Virkajari²

The scintillation detector was constructed to research ultralow concentrations of ^{14}C in liquid scintillator samples. The detector is placed in the low background Laboratory BNO INR RAS at a depth of 4900 m.w.e. Detector calibration was presented with gamma-sources ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{133}Ba and ^{137}Cs . The detector background was measured and the ratio $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ was extracted from the experimental spectrum using two methods. The values obtained are $(7.9 \pm 0.9) \times 10^{-17}$ and $(7.5 \pm 1.5) \times 10^{-17}$ respectively.

- ¹ Institute for element-organic compounds of Russian academy of sciences named A.N. Nesmeyanov, Moscow, Russia,
² Oulu University, Pyhasalmi, Finland.

Препринт ИЯИ РАН 1414/2015

Ноябрь 2015

Подписано в печать 09.10.2015 г.

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,0. Зак. 22373 Тираж 50 экз.
Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт ядерных исследований Российской
академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-302-4

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2015
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2015

Введение

В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидких детекторов для регистрации крайне редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников [1–4]. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от распадов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K , содержащихся в земных недрах. Надежная регистрация этих антинейтрино (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада этих изотопов в общий тепловой поток Земли. С другой стороны, в работе [4] рассматривается возможность регистрации солнечных нейтрино от протонного захвата на ядрах ^{13}N , ^{15}O , ^{17}F (так называемый цикл CNO) с помощью крупномасштабного жидкого сцинтилляционного детектора (типа LENA). Измерение потока этих нейтрино позволит получить важную информацию о химическом составе солнечных недр.

В настоящее время в ИЯИ РАН ведутся исследования, связанные с разработкой проекта по созданию большого сцинтилляционного детектора на Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) [3]. Предполагаемая масса детектора ~10–30 кт. Географические особенности расположения обсерватории позволяют существенно подавить фон, связанный с потоками антинейтрино от работающих реакторов АЭС и в то же время зарегистрировать потоки антинейтрино, несущие информацию о строении земной коры в данном регионе.

Регистрация редких событий сцинтилляционным детектором предъявляет исключительно высокие требования как к внешнему, так и внутреннему фону установки. Внутренний фон детектора главным образом определяется содержанием примесей радиоактивных элементов в жидком органическом сцинтилляторе (ЖОС). Так, в эксперименте Bogerino (лаборатория Гран-Сассо, Италия), благодаря достигнутому очень низкому радиоактивному фону удалось впервые зарегистрировать потоки солнечных ^7Be , *pp* нейтрино [5], а в последнее время, из детального анализа спектра фона, был рассчитан поток также и солнечных *pp*-нейтрино. Трудность в измерении потока *pp*-нейтрино и его спектра с помощью детектора на основе жидкого органического сцинтиллятора во многом связана с радиоактивностью изотопа ^{14}C , присутствующего в молекулах углеводородов нефтяного происхождения. Максимальная

энергия электрона отдачи от рассеяния pp -нейтрино ($E_{\max} = 420$ кэВ) в сцинтилляторе составляет 264 кэВ. Максимальная энергия β -распада ^{14}C — 156.48 кэВ, но с учетом конечного энергетического разрешения ($\sim 10\%$ в области 200 кэВ) и эффекта наложения импульсов, возможна регистрация событий с энергией >200 кэВ. При этом надо отметить, что сцинтиллятор детектора Borexino имеет минимальное содержание изотопа ^{14}C , по сравнению с измерениями в других сцинтилляторах. Эта величина составляет $(2.69 \pm 0.06) \times 10^{-18}$ ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$) [5]. Расчеты, основанные на возрасте нефти, из которой был приготовлен сцинтиллятор (псевдокумол), с учетом глубины залегания и содержания радиоактивных элементов в окружающих породах, дают для основных ядерных реакций, приводящих к образованию ^{14}C , предел на уровне $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-21}$ [6]. Наблюдаемое расхождение измеренных концентраций изотопа ^{14}C в сцинтилляторах (Borexino, KamLAND) и расчетных значений может быть вызвано как технологическими факторами переработки нефти, так и более фундаментальной проблемой, связанной с условиями образования нефтяных месторождений. В статье [7], где отмечается высокое требование к радиоактивной чистоте метана для использования в ТРС (Time Projection Chamber), рассматриваются различные факторы и механизмы, влияющие на колебания концентраций ^{14}C в нефтяных и газовых подземных источниках.

В работе [8] была измерена концентрация ^{14}C в органическом сцинтилляторе на основе РХЕ с помощью детектора объемом 1.5 литра. Разработка и создание низкофонового детектора небольшого объема открывает возможности для систематических исследований изотопа ^{14}C в различных образцах жидкого органического сцинтиллятора, позволяет провести анализ широкого круга факторов, определяющих его содержание, и в перспективе создать сцинтиллятор с пониженным содержанием ^{14}C .

Спектр ^{14}C

Для анализа измеренного фона на наличие в сцинтилляторе изотопа ^{14}C требуется знание формы спектра ^{14}C .

Бета-спектр изотопа ^{14}C исследуется уже на протяжении долгих лет, но точная форма спектра остается до конца не выясненной.

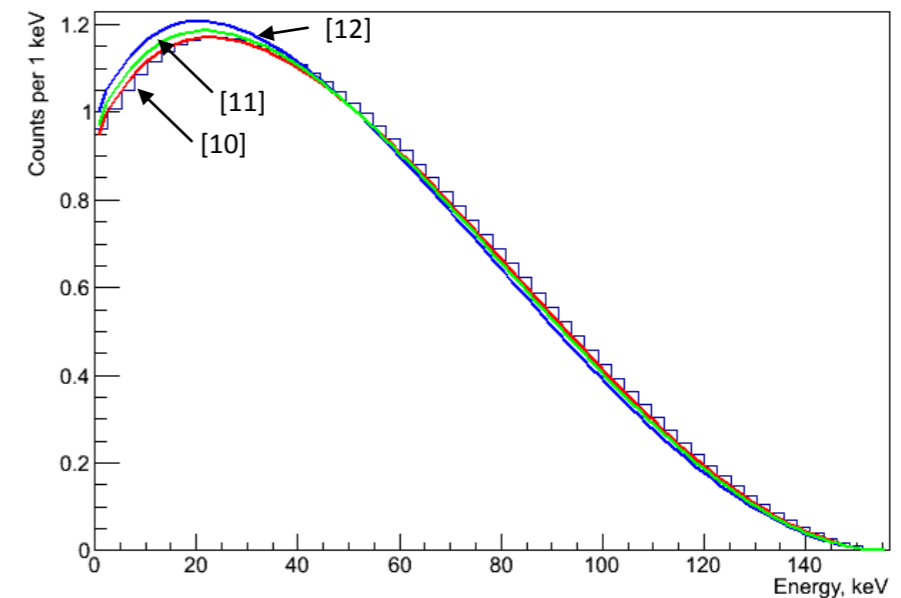


Рис. 1. Спектры ^{14}C по различным источникам. Черная гистограмма – спектр из справочника [10], красная линия – расчет разрешенного спектра по формуле (1) без учета фактора формы $C(E)$, зеленая линия — спектр, измеренный в коллаборации Borexino CTF [11], синяя линия — спектр, измеренный в работе [12]

Сложность заключается в малой концентрации ^{14}C в веществах и большом периоде полураспада (5730 лет). Бета переход является разрешенным Гамов-Теллеровского типа ($0^+ \rightarrow 1^+$). Граничная энергия перехода 156.48 ± 0.05 кэВ. Спектр бета перехода может быть записан в стандартной форме [9]

$$\frac{dN(E)}{dE} = \text{Const } pE(E_0 - E)^2 F(Z, E) C(E), \quad (1)$$

где p и E — импульс и энергия электрона, E_0 — граничная энергия распада, $F(Z, E)$ — функция Ферми, описывающая электромагнитное взаимодействие дочернего ядра с электроном, $C(E)$ — фактор формы бета-спектра. Const — нормировочный фактор, включающий все независимые от энергии множители. Обычно спектр нормируется на «1», поэтому константа часто есть просто величина, обратная интегралу спектра.

На рис. 1 показаны спектры ^{14}C , взятые из справочника [10], рассчитанные по формуле (1) без учета фактора формы и измеренные в последнее время. В работах [11] и [12] были получены значения коэффициента в факторе формы. Фактор формы может записываться в виде $C(E) = (1 + aE)$, как в [11] ($a = -0.4 \text{ МэВ}^{-1}$) или в виде $C(E) = 1 + b(E_0 - E)$, как в работе [12] ($b = (1.24 \pm 0.04) 10^{-3} \text{ кэВ}^{-1}$).

Низкофоновый детектор

Создаваемый детектор расположен в подземной низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН [13] и предназначен для измерений ультранизких концентраций изотопа ^{14}C в образцах жидкого органического сцинтиллятора. Лаборатория находится внутри горы (3700 м от входа в тоннель), на глубине 4900 м.в.э., где поток мюонов составляет $\sim 0.1 \text{ м}^{-2} \text{ час}^{-1}$. Для подавления фона от нейтронов и гамма-квантов окружающих горных пород стены, пол и потолок комнаты, где установлен сцинтилляционный детектор, выполнены последовательно из слоев полиэтилена (25 см), кадмия (1 мм) и свинца (15 см). Сам детектор размещен в коробе из оргстекла $14.5 \times 14.5 \times 120 \text{ см}^3$ и окружен со всех сторон защитой из особо чистой меди, толщиной 15 см. Принципиальная схема детектора изображена на рис. 2. Детектор включает в себя кварцевую ячейку, диаметром 100 мм и длиной 200 мм из кварцевого стекла толщиной 3 мм (полный объем около 1.5 л), заполненную образцом жидкого органического сцинтиллятора, двух световодов из органического стекла (ПММА), размером $100 \times 100 \times 300 \text{ мм}^3$ и двух низкофоновых фотоумножителей (ФЭУ) ЕТ9302В (3"). Для увеличения светосбора кварцевая ячейка и световоды обернуты зеркальной отражающей пленкой VM2000. Для лучшего оптического контакта между кварцевой ячейкой, световодами и ФЭУ использовалась силиконовая смазка. Герметичный чехол из полиэтилена, окружающий детектор снаружи, служил для защиты от радона. Из внутреннего объема радон удалялся продувкой газообразным

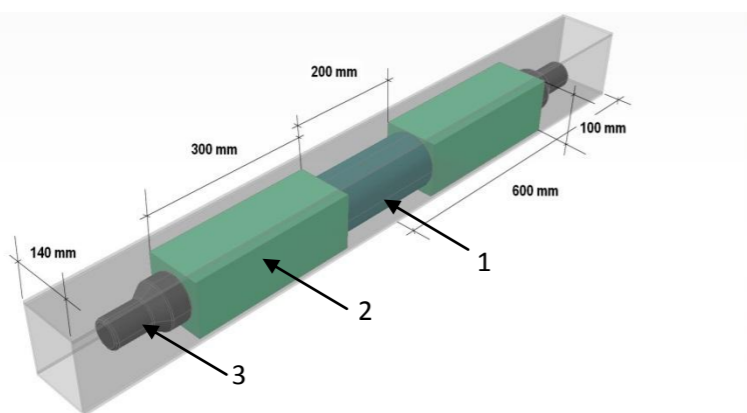


Рис. 2. Схема экспериментальной сцинтилляционной ячейки. 1 — ячейка с исследуемым ЖОС, 2 — световоды, 3 — ФЭУ

азотом. В качестве источника газообразного азота использовался сосуд Дьюара с жидким азотом.

Условия измерения ультранизких концентраций радиоуглерода делают необходимым использование в конструкции детектора элементов с низким содержанием радиоактивных примесей. С помощью низкофонового полупроводникового детектора из высокочистого германия HPGe были проведены измерения интенсивности гамма-квантов кварцевой ячейки с образцом жидкого сцинтиллятора и фотоумножителя ЕТ9302В. По данным измерений были выполнены расчеты содержания радиоактивных примесей (Бк/кг) в ячейке с ЖОС и в фотоумножителе, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Содержание радиоактивных примесей в ячейке с ЖОС и ФЭУ

Изотоп	Кварцевая ячейка с ЖОС Активность в Бк/кг	ЕТ9306 Активность в Бк/кг [Бк/ФЭУ]
^{40}K	$\leq 1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.71 \pm 0.09 [0.26 \pm 0.01]$
^{208}Tl	$\leq 9.4 \cdot 10^{-4}$	$(3.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-2} [(5.4 \pm 0.8) \cdot 10^{-3}]$
^{214}Bi	$(3.5 \pm 1.7) \cdot 10^{-3}$	$1.21 \pm 0.03 [0.180 \pm 0.004]$
^{228}Ac	$\leq 2.3 \cdot 10^{-3}$	$0.10 \pm 0.01 [(1.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}]$

Для дальнейшего улучшения фоновых характеристик сцинтилляционного детектора планируется использование более низкофоновых фотоумножителей и оптимизация защиты ячейки от излучения делителей напряжения ФЭУ.

Исследуемый сцинтиллятор

Измерения были проведены с жидким органическим сцинтиллятором на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) с содержанием 2 г/л сцинтилляционной добавки - 2-(4-Biphenyl)-5-phenyloxazole (ВРО). Выбор ЛАБа для анализа был частично связан с тем, что в новых крупномасштабных сцинтилляционных детекторах планируется использовать сцинтиллятор на основе этого растворителя [3].

ЛАБ представляет собой смесь углеводородов с общей формулой $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$, плотностью 0.856 г/л и температурой вспышки 143°C [14, 15]. Исследованный в работе ЛАБ (КИНЕФ, Кириши, Россия) имеет усредненную формулу $\text{C}_{17,73}\text{H}_{29,46}$ и состоит в основном из четырех групп компонентов: $\text{C}_{16}\text{H}_{26} - 0.125$, $\text{C}_{17}\text{H}_{28} - 0.293$, $\text{C}_{18}\text{H}_{30} - 0.315$, $\text{C}_{19}\text{H}_{32} -$

Таблица 2. Содержание ядер водорода углерода и электронов в 1000 т линейного алкилбензола (ЛАБ) и псевдокумола (РС)

1000 т	ЛАБ	РС
Формула	$C_{17,73}H_{29,46}$	C_9H_{12}
H	7.330	6.010
C	4.410	4.510
Электроны	3.440	3.310

коэнергетической (< 50 кэВ) области спектра от распада радиоуглерода.

Сравнительное содержание ядер водорода H, углерода C и электронов в 1000 т ЛАБ и псевдокумола приведено в таблице 2.

Для исследования был использован образец сцинтиллятора объемом 1340 мл, который полностью входил в ячейку 1.5 л. Сверху оставался небольшой объем, который заполнялся азотом.

Калибровка энергетической шкалы сцинтилляционной ячейки

Для энергетической калибровки детектора использовались четыре источника гамма-квантов: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{133}Ba и ^{137}Cs . Энергии гамма-квантов представлены в таблице 3. Здесь же показана энергии электронов отдачи при рассеянии гамма-кванта назад и энергия в пике полного поглощения (ППП) для квантов малых энергий.

^{133}Ba имеет несколько гамма-линий, которые сливаются в один широкий пик в наблюдаемом спектре. Пик от малых энергий (80 кэВ) оказался не виден на фоне экспоненциального роста рассеянных гамма-квантов, а гамма-кванты больших энергий образовали два сливающихся пика с энергетическими делениями около 200 кэВ и 150 кэВ.

Оказалось возможным разделить пики подгонкой не одной, а двумя гауссовыми функциями. При этом значение хи квадрат оказывается меньше, чем при подгонке одним гауссовым распределением.

Спектры калибровочных источников показаны рис. 3. Пик ^{137}Cs снимался на другом диапазоне анализатора, так как выходил из диапазона измерений, его спектр показан на рис. 4.

0.267, каждый из которых присутствует в виде смеси изомеров.

Для жидкого сцинтиллятора на основе ЛАБа были проведены измерения световых выхода и прозрачности, которые дали соответственно значения ~ 8000 фотон/МэВ и 15 м при длине волны света 420 нм. Полученные значения позволяют проводить измерения в низ-

Таблица 3. Калибровочные источники и их положение на шкале

Источник	Энергия излучаемых гамма-квантов, кэВ	Энергия электрона отдачи при рассеянии назад, кэВ	Энергия в наблюдаемом пике, кэВ	Номер канала пика
^{137}Cs	661.66	477.334	450	5040
^{133}Ba	383.85 (9.6%) 356.02 (45%) 302.85 (13.4%) 276.4 (5.2%) 81.0 (25%) 79.61 (1.9%)	230.46 207.27 164.27 143.63	190 151.5 80.9 (ППП)	2168.4 1585.0 Не виден
^{109}Cd	88.04 (100%)		88 (ППП)	691.9
^{241}Am	59.54 (93%) 26.34 (6%)		59.5 (ППП)	507.2 Не виден

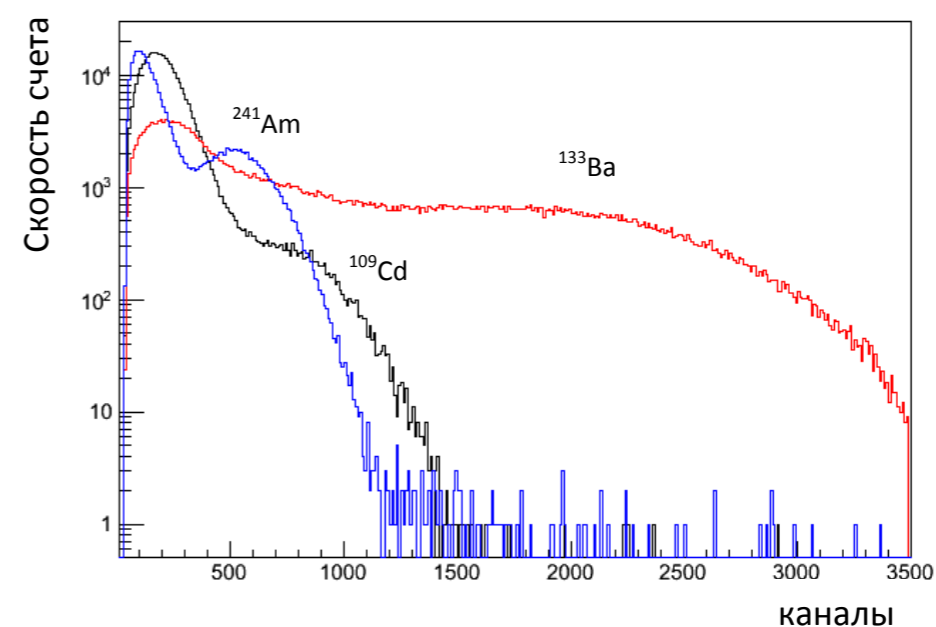


Рис. 3. Экспериментальные спектры калибровочных гамма-источников

По пяти точкам построена калибровочная кривая, показанная на рис. 5. В области малых энергий шкала оказывается нелинейной из-за эффекта Биркса [16] или так называемого сцинтилляционного дефекта, поэтому для аппроксимации кривой использовалась парабола.

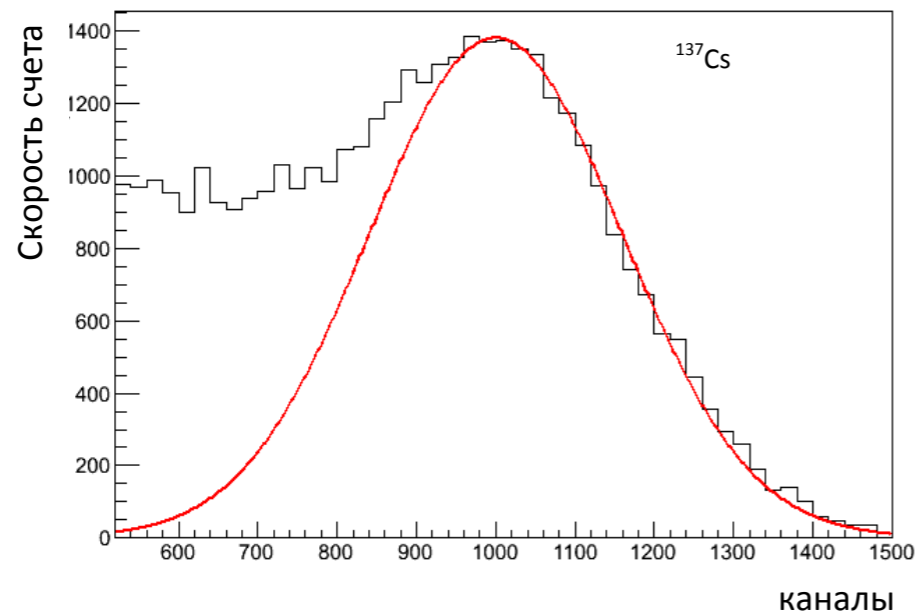


Рис. 4. Экспериментальный спектр гамма-источника ^{137}Cs . Красная линия – гауссиана, описывающая положение пика

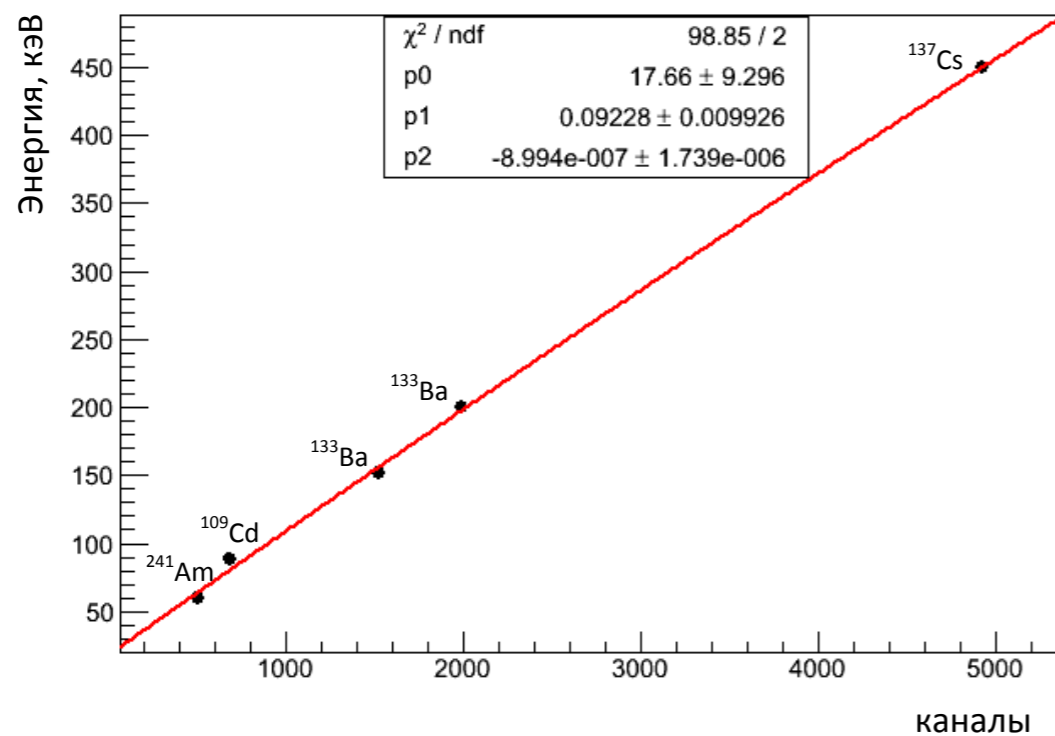


Рис. 5. Калибровочная кривая, проведенная по экспериментальным пикам. Показаны параметры параболы, описывающей кривую

Определение вклада изотопа ^{14}C в измеренный фон сцинтилляционной ячейки

Измерение содержания ^{14}C в объеме сцинтиллятора проводилось по данным, полученным в результате 187.6 часов измерения фона ячейки в низкофоновой камере. Калибровочные данные до и после серии измерений оказались идентичными (см. табл. 3).

Расчеты Монте Карло показали, что фон, определяемый наличием естественной радиоактивности, формируется из рассеянных гамма-квантов. Фон состоит из постоянной величины для больших энергий и экспоненциально увеличивается с уменьшением энергии. Таким образом, для определения ^{14}C измеренный спектр описывался суммой трех компонент: постоянной, экспоненты и собственно спектра ^{14}C

$$\frac{dN(E)}{dE} = C_0 + C_1 e^{-C_2/E} + C_3 F_{\text{beta}}(E). \quad (2)$$

Для минимизации отклонения приведенной функции (2) с измеренными данными использовался стандартный пакет для обработки экспериментальных данных ROOT версия 5.30/02 [17].

На рис. 6 показан результат минимизации. В качестве $F_{\text{beta}}(E)$ использовался спектр, измеренный в БНО [12]. Результат незначительно отличался от того, который был получен при использовании обычного разрешенного бета-спектра без учета фактора формы.

Коэффициент C_3 определяет нормировку бета-спектра, то есть это и есть количество распадов ^{14}C в объеме сцинтиллятора за время измерения.

Интеграл бета-спектра ^{14}C за время измерения 187.6 часов составил 10325 событий. С учетом объема сцинтиллятора (1340 мл) получено значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (3.9 \pm 0.5) \times 10^{-17}$. Варьирование нижнего порога измеренного спектра привело к изменению значения от 8.2 до 9.1 в пределах экспериментальной погрешности. Наилучшее соотношение эффекта и фона достигнуто при пороге 40 кэВ.

Параллельно был использован другой метод минимизации функции (2). Использовался метод максимального правдоподобия со случайным выбором параметров функции (2) в широком интервале значений. Калибровка при этом производилась подбором параметров сцинтилля-

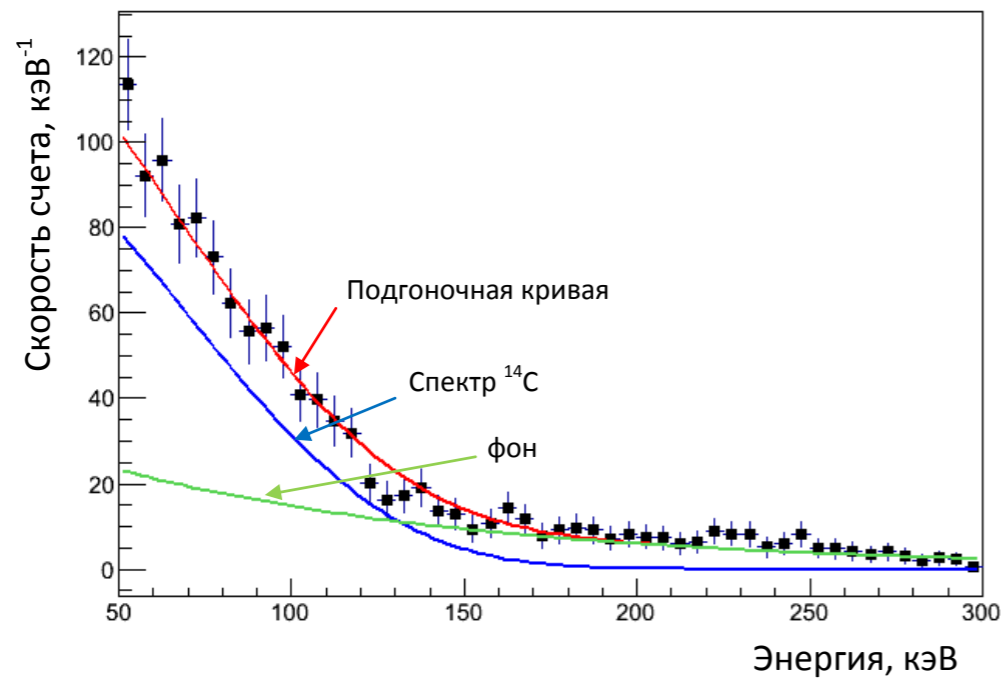


Рис. 6. Гистограмма фона по 5 кЭВ в бине (черные точки с ошибкой). Красная линия — подгоночная кривая в виде суммы постоянной, экспоненты и бета-спектра ^{14}C . Зеленая линия — фон гамма-квантов в виде суммы постоянной и экспоненты. Синяя линия — бета-спектр ^{14}C

тора методом Монте Карло до совпадения с измеренными спектрами гамма-источников. Значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, полученное этим методом, совпало в пределах экспериментальной погрешности с первым методом $(2.8 \pm 0.7) \times 10^{-17}$.

На рис. 7 показан экспериментальный спектр ^{133}Ba в сравнении с рассчитанным Монте Карло.

Заключение

Создана установка по измерению содержания радиоуглерода ^{14}C в образцах жидкого сцинтиллятора. Проведены первые измерения со сцинтиллятором на основе отечественного ЛАБа. Результат содержания ^{14}C оказывается на порядок больше полученного в сцинтилляторе в детекторе Borexino [5]. Усредненное по двум методам измерения дает значение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = (3.3 \pm 0.5) \times 10^{-17}$. Возможно псевдокумол (РС), находящийся в детекторе Borexino в виде сцинтиллятора, имеет изначально меньшее содержание ^{14}C .

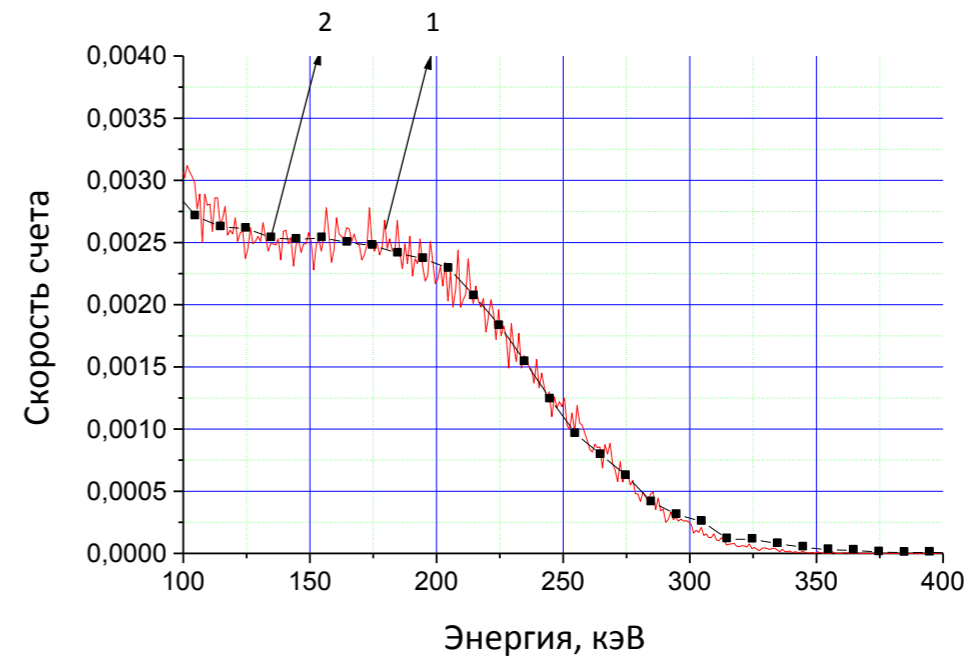


Рис. 7. Спектр от калибровочного источника ^{133}Ba . 1 — экспериментально измеренный спектр (красная линия), 2 — спектр, рассчитанный Монте Карло (черная линия с квадратиками)

Предполагается исследовать образцы сцинтиллятора с основой из растворителя, полученного из различной нефти, чтобы определить влияние месторождения на содержание ^{14}C . Также будут исследованы растворители, полученные из каменного угля.

Проводится анализ фонов детектора с целью их дальнейшего подавления и снижения порога детектора для более уверенной регистрации бета-спектра ^{14}C .

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-22-03059 и № 13-02-92440, а также Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика».

Литература

1. Wurm Michael, Beacom John F., Bezrukov Leonid et al. The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA. White Paper ArXiv: 1104.5620 [astro-ph. IM].
2. Learned John G., Dye Stephen T. and Pakvasa Sandip, Nano-Hano. A deep ocean anti-neutrino detector for unique neutrino physics geophysics studies. arXiv: 0810.4975 [hep-ex].
3. Барабанов И.Р., Новикова Г.Я., Синева В.В., Янович Е.А., Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН 1228/2009. Barabanov I. R., Novikova G. Ya., Sineva V. V. and Yanovich E. A., Research of the natural neutrino fluxes by use of large volume scintillation detector at Baksan. arXiv: 0908.1466 [hep-ph].
4. Villante F.L. CNO solar neutrinos: a challenge for gigantic ultra-pure liquid scintillator detectors. arXiv:1410.2796 [hep-ph], 2014.
5. Angelo D.D., Bellini G., Benziger J. et al., Recent Borexino results and prospects for near future. arXiv: 1405.1779 [hep-ex].
6. Barabanov I., Bezrukov L., Resconi E., Schonert S., The ^{14}C abundance in liquid organic scintillators and oil. Препринт ИЯИ-1316/2012.
7. Bonvicini G., Harris N., Paolone V, The chemical history of $\text{C}14$ in deep oilfields. arXiv:hep-ex/0308025, 2003.
8. Buck C. et al., ПТЭ, № 1, с. 40, 2012; Instruments and Experimental Techniques, 55, 34, 2012.
9. Дзелепов Б. С., Зырянова Л. Н., Суслов Ю. П. Бета-процессы: функции для анализа бета-спектров и электронного захвата, Л.: Наука, 1972.
10. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Александрин В. Г., Ружанский П. А., Бета-излучение продуктов деления. Справочник, М.: Атомиздат, 1978.
11. Alimonti G., Angloher G., Arpesella C. et al. (Borexino Collaboration), Measurement of the ^{14}C abundance in a low-background liquid scintillator, Physics Letters B 422, 349, 1998.
12. Kuzminov V. V. and Osetrova N. Ya., Precise measurement of ^{14}C beta spectrum with the use of wallless proportional counter, Ядерная физика, 63 (7), 1365, 2000.
13. Гаврилюк Ю. М., Гангапшев А. М., Гежаев А.М., Казалов В. В., Кузьминов В. В., Панасенко С. И., Якименко С. П.. «Рабочие характеристики низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900». Москва, Препринт ИЯИ РАН 1301/2011; Gavriljuk Ju.M., Gangapshev A.M., Gezhaev A.M. et al. "Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory) arXiv: 1204.6424 [physics.ins-det].
14. Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Данилов Н.А. и др., Физико-химическое исследование линейного алкилбензола как базового компонента для создания сцинтилляционных нейтринных детекторов. Журнал прикладной химии, т. 84, вып. 3, с. 385, 2011.
15. Безруков Л.Б., Бакулина Н.И., Иконников Н.С., Моргалюк В.П., Новикова Г.Я. и Чепурнов А.С., Исследование прозрачности отечественного ЛАБа как растворителя сцинтилляторов большого объема. Препринт ИЯИ-1382/2014.
16. Birks J.B., The Theory and Practice of Scintillation Counting. London: Pergamon, 1964.
17. <http://root.cern.ch>.
18. Measuring of the ^{14}C low abundance in liquid scintillator samples using small volume detector in low background chamber at Baksan