

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.6

**Nd-СОДЕРЖАЩИЙ ЖИДКИЙ ОРГАНИЧЕСКИЙ СЦИНТИЛЛЯТОР  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА**

© 2012 г. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, С. Cattadori\*, Н. А. Данилов\*\*,  
А. Di Vacri\*\*\*, А. Ianni\*\*\*, S. Nisi\*\*\*, Г. Я. Новикова, F. Ortica\*\*\*\*,  
А. Romani\*\*\*\*, С. Salvo\*\*\*, О. Ю. Смирнов\*\*\*\*\*, Е. А. Янович

*Институт ядерных исследований РАН*

*Россия, 119899, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а*

*\*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare-Milano Bicocca, Milano, Italy*

*\*\*Институт физической химии и электрохимии им А.Н. Фрумкина РАН,  
Москва, Россия*

*\*\*\*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare-Laboratori Nazionali del Gran Sasso,  
Assergi, Italy*

*\*\*\*\*Dipartimento di Chimica, Università di Perugia and INFN, Perugia, Italy*

*\*\*\*\*\*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна Московской обл., Россия*

Поступила в редакцию 12.09.2012 г.

Для эксперимента по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада на ядре  $^{150}\text{Nd}$  разработан Nd-содержащий жидкий органический сцинтиллятор на основе растворителя псевдокумола (РС). Для нескольких значений концентрации неодима измерены оптические характеристики сцинтиллятора. Измерения, выполненные на двух модулях длиной 1 и 2 м, позволили оценить эффективную прозрачность Nd-содержащего (6.5 г/л Nd) сцинтиллятора РС. Продемонстрирована стабильность характеристик сцинтиллятора в течение 1 года. Проведен анализ содержания радиоактивных примесей и выполнена оценка чувствительности эксперимента к эффективной массе майорановского нейтрино  $\langle m_\nu \rangle \sim 0.05\text{--}0.1$  эВ для детектора, содержащего 12 т сцинтиллятора.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного  $\beta$ -распада является фундаментальной задачей современной физики. Программа поиска и надежного подтверждения событий, связанных с распадом  $0\nu\beta\beta$ , включает постановку экспериментов с использованием ядер различных элементов. В настоящий момент наилучший результат был получен в эксперименте [1] на ядре  $^{76}\text{Ge}$ . Одним из перспективных кандидатов для проведения эксперимента по поиску распада  $0\nu\beta\beta$  является ядро изотопа  $^{150}\text{Nd}$ . В планируемых экспериментах SUPERNEMO [2] и SNO+ [3] рассматривается возможность применения этого изотопа. Большая энергия перехода  $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$  (3.367 МэВ) увеличивает вероятность процесса  $0\nu\beta\beta$ -распада ( $\sim E_{\beta\beta}^5$ ) и, кроме того, обеспечивает более благоприятные фоновые условия благодаря уменьшению влияния естественной радиоактивности детектора и окружающих материалов.

В предыдущих экспериментах по двойному  $\beta$ -распаду на ядре  $^{150}\text{Nd}$  были использованы полупроводниковый германиевый детектор (измерялся переход на возбужденный уровень  $^{150}\text{Sm}$  [4]) и трековый детектор (эксперимент NEMO [5]).

В эксперименте NEMO-3 [6] наиболее точно был измерен период полураспада двухнейтринного двойного  $\beta$ -распада ( $2\nu\beta\beta$ ) на основное и возбужденное состояния ядра  $^{150}\text{Sm}$ , а также получен наилучший предел на безнейтринную моду распада  $0\nu\beta\beta$  ядра  $^{150}\text{Nd}$  —  $T_{1/2}(0\nu) > 1.8 \cdot 10^{22}$  лет (90% CL (Confidence Level или уровень достоверности)).

Увеличение массы изотопа  $^{150}\text{Nd}$  повышает чувствительность эксперимента, т.е. обеспечивает возможность достижения более высокого предела величины  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta)$ . Детектор на основе жидкого сцинтиллятора, в принципе, позволяет осуществить эксперимент с десятками, сотнями и более килограммов растворенного неодима. Эффективность регистрации электронов от  $0\nu\beta\beta$ -распада при этом будет близка к 100%. Помимо неодимсодержащего сцинтиллятора, разрабатываются также олово- ( $^{124}\text{Sn}$ ) [7] и молибденсодержащий ( $^{100}\text{Mo}$ ) [8] сцинтилляторы для поиска  $0\nu\beta\beta$ -событий.

В данной статье приводятся результаты исследования, связанного с разработкой Nd-содержащего сцинтиллятора, полученные в рамках проекта MetaLS.

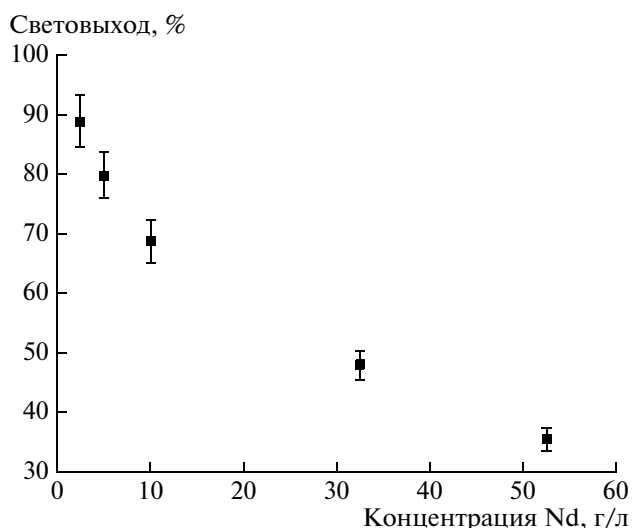


Рис. 1. Зависимость световыхода от концентрации Nd, растворенного в сцинтиляторе PC (BPO (4 г/л)).

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 2.1. Световыход

Высокое энергетическое разрешение детектора является важным фактором в экспериментах по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада, позволяющим дискриминировать различные фоновые события, особенно вызванные  $2\nu\beta\beta$ -распадом. Разработка Nd-содержащего сцинтилятора направлена на получение такой композиции, которая позволила бы обеспечить наилучшие характеристики световыхода и прозрачности. В качестве основы сцинтилятора был использован псевдокумол PC (1,2,4-триметилбензол), световыход которого при концентрации активатора PPO (2,5-дифенилоксазол) 1.5 г/л составляет  $\sim 11\,000$  фотонов/МэВ [9]. Исходя из опыта, полученного при разработке Yb/In/Gd-содержащих сцинтиляторов [10], композиция раствора содержала соль карбоксилата неодима, а именно металлоорганический комплекс на основе 2-метилвалериановой кислоты Nd(2MVA). Изменяя количество растворенного неодида в псевдокумоле, была измерена зависимость световыхода от концентрации металла в сцинтиляторе. Световыход измерялся на образцах объемом 5 мл, залитых в оптические кюветы с притертым дном, вертикально установленные на фотокатод ф.э.у. (3", Philips XP3462). Перед измерением жидкость барботировалась аргоном для удаления растворенного кислорода воздуха. В качестве  $\gamma$ -источника использовался  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 662$  кэВ). Полученная зависимость световыхода от концентрации Nd для сцинтилятора с активатором BPO (2-(4-бифенил)-5-фенилоксазол) представлена на рис. 1.

Также был измерен световыход сцинтилятора с добавками PPO и bis-MSB. Для композиции Nd(6.5 г/л) PC(PPO(1.5 г/л), bis-MSB(30 мг/л))

световыход составил  $\sim 80\%$  относительно не содержащего металл PC(PPO(1.5 г/л)). Дальнейшее повышение концентрации металла приводило к падению световыхода до уровня  $\sim 35\%$  (Nd(52 г/л)). Примеры энергетических спектров для сцинтиляторов с различным содержанием растворенного неодида приведены на рис. 2. На спектре 3 (52 г/л Nd) виден пик полного поглощения.

### 2.2. Прозрачность

Предварительная информация об эффективной прозрачности неодида содержащих жидких образцов в области спектральной чувствительности ф.э.у. была получена из спектров поглощения в ультрафиолетовой области. Измерения были проведены на спектрофотометрах UV/VIS PE Lambda 18 и Cary 300 Scan (VARIAN) с использованием кварцевых кювет длиной от 10 до 100 мм. На рис. 3 представлен спектр поглощения неодида в псевдокумоле и для сравнения – эмиссионные спектры PPO, BPO. Согласно рисунку, левый край спектра PPO в большей степени по сравнению с BPO перекрывается с линией поглощения неодида ( $\sim 354$  нм). Это ведет к поглощению фотонов и, как следствие, должно сказываться на энергетическом разрешении сцинтиляционного детектора. В дальнейшем все исследования с Nd-содержащим сцинтилятором проводились с использованием активатора BPO или PPO с добавкой шифтера bis-MSB ( $\sim 30$  мг/л).

Помимо поглощения фотонов ионами растворенного неодида, возможно влияние на прозрачность примесей других элементов. Так, было обнаружено, что в ряде образцов неодида содержится примесь другого редкоземельного элемента – празеодима Pr – на уровне  $\sim 1\%$ . Линия поглощения Pr ( $\lambda = 444.2$  нм) с коэффициентом экстинкции  $\varepsilon = 10.49$  л/(моль·см) находится в области эмиссионного спектра активатора. На рис. 4 изображены у.ф.-спектры поглощения двух образцов Nd-содержащего раствора, приготовленных из оксида неодида, от различных фирм производителей. Масс-спектрометрический анализ на ICP-MS показал, что образец оксида неодида фирмы Aldrich имеет наименьшую концентрацию Pr ( $< 3$  ppm). В дальнейшем все исследования проводились именно с этим сцинтилятором.

### 2.3. Время высвечивания

Малое время высвечивания, характерное для жидкого органического сцинтилятора, позволяет достичь хорошего пространственного разрешения, что является важным условием для эффективной дискриминации фоновых событий от распадов  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$  и других радиоактивных ядер. Чтобы оценить возможное влияние неодида на временные характеристики сцинтилятора,

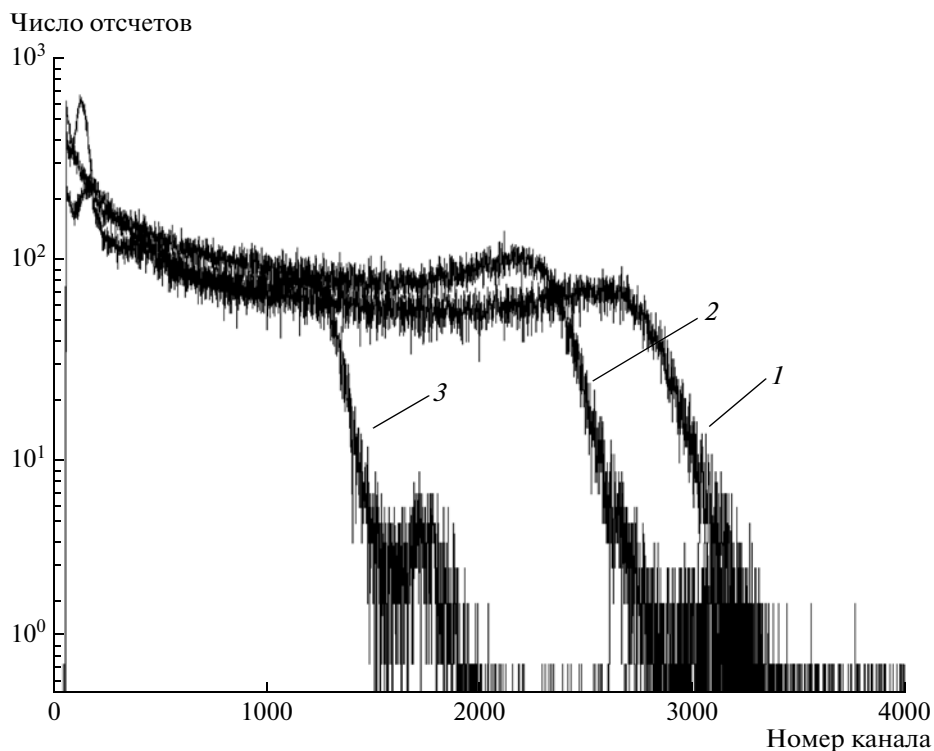


Рис. 2. Спектры (источник  $^{137}\text{Cs}$ ), полученные для трех образцов жидкого органического сцинтиллятора с различным содержанием растворенного Nd: 1 – 0; 2 – 10.2; 3 – 52.0 г/л.

было измерено время высвечивания двух образцов: РС и РС(РРО(1.5 г/л), Nd(10 г/л)). Измерения выполнялись с помощью флуоресцентного спектрометра Edinburgh Instruments 199S в режиме единичного счета фотонов. Радиационным ис-

точником возбуждения служила Хе-лампа ( $\lambda = 267$  нм). Временное разрешение спектрометра 0.4 нс.

По результатам измерений время высвечивания составило:  $\tau_F = 29.5$  нс для РС и  $\tau_F = 3.5$  нс для

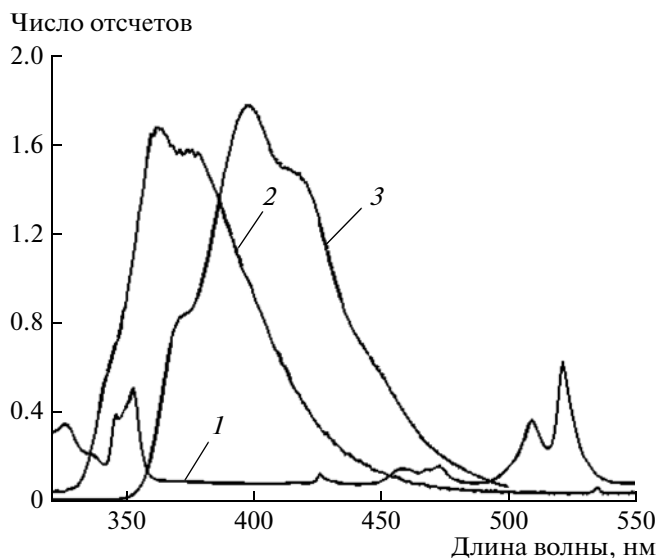


Рис. 3. Спектр поглощения неодима в псевдокумоле (1) и эмиссионные спектры активаторов РРО (2) и ВРО (3).

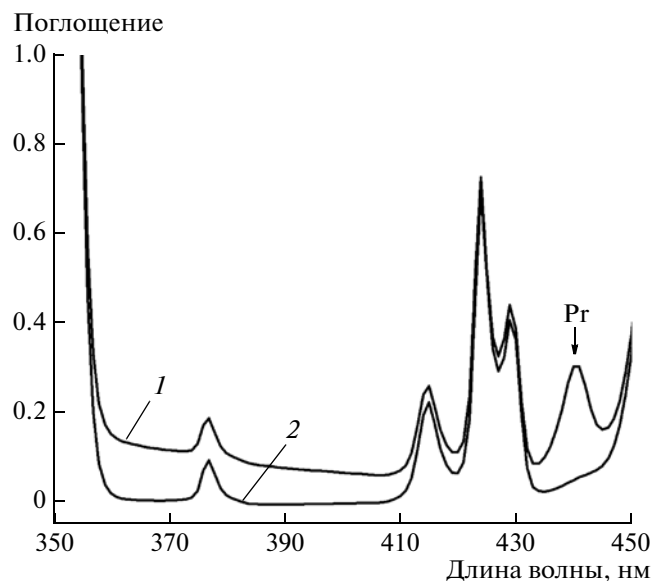


Рис. 4. Спектры поглощения водных растворов соли хлорида неодима с концентрацией Pr:  $\sim 10^4$  ppm (1);  $< 3$  ppm (Aldrich) (2). Размер кюветы 10 см.

Номер канала а.ц.п.

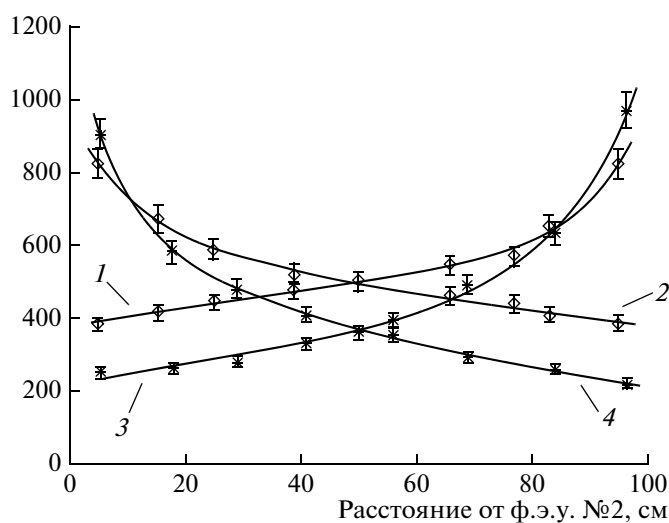


Рис. 5. Положение комптоновского края спектра ( $L_{1/2}$ ) в зависимости от расстояния между источником  $^{137}\text{Cs}$  и ф.э.у. для двух композиций сцинтиллятора: 1, 2 – PC(PPO(1.5 г/л)) и 3, 4 – PC(PPO(1.5 г/л), bis-MSB(30 мг/л), Nd(6.5 г/л)). Две кривые для одного образца отображают полученную зависимость для каждого из двух ф.э.у., установленных по торцам ячейки.

PC(PPO(1.5 г/л), Nd(10 г/л)). Полученные данные согласуются с результатами измерений, выполненных для образцов PC и PC(PPO(1.5 г/л)) с помощью ионизационного источника возбуждения методом задержанных совпадений [11]. Таким образом, добавка неодима в концентрации  $<10$  г/л не ухудшает временные характеристики сцинтиллятора, время высвечивания определяется концентрацией растворенного PPO.

#### 2.4. Оптическая ячейка длиной 1 м

Исследование оптических характеристик Nd-содержащего сцинтиллятора было продолжено с помощью кварцевой ячейки длиной 1 м и сечением  $5 \times 5$  см<sup>2</sup>. Сцинтилляционная вспышка регистрировалась двумя ф.э.у. (3", Philips XR3462), установленными по торцам ячейки. Для увеличения светосбора боковые стенки ячейки были обернуты отражающей зеркальной пленкой VM2000. В качестве источника ионизации использовался  $\gamma$ -изотоп  $^{137}\text{Cs}$  активностью 100 кБк. Источник находился внутри свинцового контейнера с диаметром коллиматора 5 мм. Измерения выполнялись при установке источника  $^{137}\text{Cs}$  около ячейки на различном расстоянии относительно ф.э.у. Объем залитого в ячейку сцинтиллятора составлял  $\sim 2.2$  л. Ячейка после заливки сцинтиллятора продувалась азотом и герметично закрывалась.

Были проведены измерения со сцинтилляторами PC(PPO(1.5 г/л)) и PC(PPO(1.5 г/л), bis-

MSB(30 мг/л), Nd(6.5 г/л)). Данные, полученные для PC(PPO(1.5 г/л)), были использованы для вычисления эффективной прозрачности Nd-содержащего сцинтиллятора.

Для двух композиций сцинтиллятора была измерена зависимость амплитуды сигнала от расстояния между источником  $^{137}\text{Cs}$  и ф.э.у. Перед началом измерений сигналы с двух ф.э.у. уравнивались, для чего  $\gamma$ -источник устанавливался в середине ячейки, на расстоянии 50 см от ф.э.у. Для набора спектров использовалась схема совпадений, в которой сигналы с двух ф.э.у., усиленные (усилитель PS777) и задержанные на  $\sim 200$  нс, подавались на два входа а.ц.п. (LeCroy 2249A). Время интегрирования составляло 100 нс. Количество собранного света в зависимости от расстояния до  $\gamma$ -источника оценивалось по положению края 50%-ного уровня комптоновского спектра электронов  $L_{1/2}$ . Полученная зависимость была аппроксимирована функцией вида

$$y(x) = k_1/x^2 + k_2e^{-x/\lambda},$$

где первый член функции отражает влияние геометрического фактора на светосбор, а второй — описывает уменьшение числа собранных фотонов из-за потерь при распространении вдоль оптической ячейки. Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и эффективная длина поглощения (прозрачность)  $\lambda$  неизвестны и определялись по результатам фитирования. На рис. 5 представлены результаты измерений интенсивности собранного света в зависимости от расстояния между источником  $^{137}\text{Cs}$  и одним из двух ф.э.у.

В результате фитирования для ячейки с двумя композициями сцинтиллятора была вычислена эффективная длина поглощения  $\lambda$ :  $168 \pm 12$  см для PC и  $74 \pm 3$  см для NdLS. Измеренная в сферической геометрии (эксперимент BOREXINO, сцинтиллятор PC(PPO(1.5 г/л))) величина  $\lambda_{\text{PC}}$  составила  $\sim 8$  м. [12]. Более низкое значение  $\lambda$  в случае одномерной ячейки объясняется потерей фотонов в боковых стенках ячейки из-за несовершенства качества поверхности. Нормировка результатов измерений ячейки с Nd-содержащим сцинтиллятором на значение  $\lambda = 8$  м (PC(PPO(1.5 г/л)), BOREXINO) дает величину  $\lambda_{\text{NdLS}} = 216 \pm 12$  см.

#### 2.5. Стабильность

Стабильность характеристик сцинтиллятора является важным фактором при создании детектора по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада. Повторные измерения эффективной длины поглощения ( $\lambda$ ) Nd-содержащего сцинтиллятора в ячейке длиной 1 м были проведены через год. Результаты двух измерений (рис. 6), сделанных с интервалом 1 год, показали, что в пределах точности измерений величина  $\lambda$  не изменилась.

### 2.6. Содержание радиоактивных примесей и фон Nd-содержащего сцинтиллятора

Наиболее опасным в экспериментах по поиску  $0\nu\beta\beta$ -распада является внутренний фон, обусловленный содержанием радиоактивных примесей. Большая энергия перехода (3.367 МэВ) ядра  $^{150}\text{Nd}$  является исключительно благоприятным фактором, так как в этом случае суммарная энергия двух электронов, образовавшихся в результате  $0\nu\beta\beta$ -распада, лежит в области, превышающей энерговыделение от распада большинства естественных радиоактивных элементов. Исключение составляет  $^{232}\text{Th}$ , а именно изотоп  $^{208}\text{Tl}$  ( $T_{1/2} = 3.1$  мин), относящийся к продуктам распада ториевого ряда и распадающийся путем  $\beta^-$ -распада с энергией  $\sim 5$  МэВ.

С помощью низкофонового полупроводникового HPGe-детектора (лаборатория Гран Сассо, Италия [13]) и масс-спектрометра ICP-MS было измерено содержание примесей в образце оксида неодима  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Измерение на HPGe-детекторе проводилось в течение 37.3 дней. Анализировался образец  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  массой 50.2 г. Результаты измерений представлены в таблице.

Из таблицы видно, что анализ содержания тория в оксиде неодима, выполненный с помощью двух различных методов, дает сопоставимые значения концентрации. В заключение было также измерено содержание  $^{232}\text{Th}$  непосредственно в Nd-содержащем жидком сцинтилляторе ( $\text{Nd}(6.5 \text{ г/л})$ ). Для этого кварцевая ампула со сцинтиллятором объемом 400 мл была опущена и установлена в центре установки STF (BOREXINO) [14], содержащей  $\sim 4$  т жидкого органического сцинтиллятора PC(PPO(1.5 г/л)). Регистрировались события в области 2.6 МэВ ( $\pm 3\sigma$ ), ограниченной радиусом 40 см относительно центра детектора. Измерения проводились в течение 16.85 дней. По результатам измерений был получен предел на содержание  $^{232}\text{Th}$  ( $<1 \text{ ppb}$ ).

Номер канала а.ц.п.

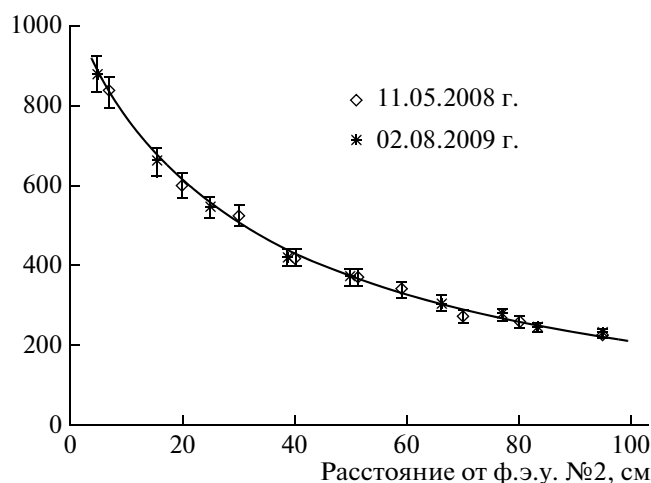


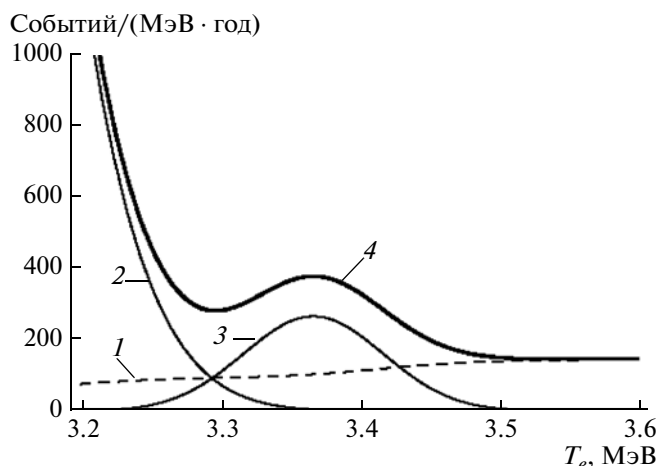
Рис. 6. Количество собранного света в зависимости от расстояния между источником  $^{137}\text{Cs}$  и ф.э.у., измеренное с интервалом 1 год. Ячейка длиной 1 м заполнена Nd-содержащим сцинтиллятором.

### 3. ПРОЕКТ ДЕТЕКТОРА НА 12 т Nd-СОДЕРЖАЩЕГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Рассмотрим возможность создания Nd-содержащего жидкого сцинтилляционного детектора с чувствительностью, соответствующей массе нейтрино на уровне  $\sim 100$  мэВ. Предполагается использовать сферическую конструкцию детектора [15], содержащего 12 т жидкого сцинтиллятора с концентрацией Nd 6.5 г/л, аналогичную детектору BOREXINO. Концентрацию изотопа  $^{150}\text{Nd}$  в естественной смеси планируется увеличить до 60%, например, с помощью технологии лазерного разделения AVLIS [16]. Достигнутые характеристики Nd-сцинтиллятора (световыход 80% относительно PC(PPO(1.5 г/л)) и эффективная прозрачность  $\sim 2$  м) с учетом того, что ф.э.у. (квантовая чувствительность фотокатода 35%) занимают 80% поверхности сферы, позволяют получить энергетическое разрешение  $\sim 3.5\%$  для энергии 3.367 МэВ ( $Q_{\beta\beta}$ ).

Содержание примесей, ppb, в оксиде неодима, измеренное с помощью HPGe-детектора и масс-спектрометра ICP-MS

Гамма-спектрометрия (HPGe-детектор)							
$^{228}\text{Ra}$	$^{228}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{234}\text{Th}$	$^{234}\text{Pa}_m$	$^{235}\text{U}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
$6.6 \pm 1.8$	$8.5 \pm 1.1$	$0.39 \pm 0.23$	$<22$	$<9.5$	$<9.1$	$<86 \text{ мБк/кг}$	$9.7 \pm 2.7 \text{ мБк/кг}$
Масс-спектрометрия (ICP-MS)							
Проба № 1		Проба № 2		Проба № 3			
$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$
$5 \pm 1$	$<0.2$	$7 \pm 2$	$<0.3$	$6 \pm 1$	$<0.3$		



**Рис. 7.** Ожидаемый спектр электронов для  $m_{\beta\beta}^2 \sim 100$  мэВ в жидком сцинтилляционном детекторе, содержащем 92 кг обогащенного  $^{150}\text{Nd}$  (60%): 1 — фон от распада  $^{208}\text{Tl}$ ; 2 — фон от  $2\nu\beta\beta$ -распада  $^{150}\text{Nd}$ ; 3 — ожидаемый эффект от  $0\nu\beta\beta$ -распада  $^{150}\text{Nd}$ ; 4 — суммарный спектр.

В [15] было показано, что концентрация  $^{232}\text{Th}$  в сцинтилляторе РС(РРО) может быть понижена до  $\sim 10^{-17}$  г/г.

Примесь тория ( $^{208}\text{Tl}$ ) в неодиме является основным источником фона. Возможны две методики очистки неодима от тория: хроматографическое разделение на колонке, наполненной ионообменной смолой UTEVA, обеспечивающее фактор разделения неодима от U и Th  $\sim 200$ , и основанная на жидкостной экстракции методика, позволяющая уменьшить концентрации U и Th до уровня  $\sim 1$  ppt [17]. При достижении степени очистки от Th уровня 1 ppt и одновременном 90%-ном подавлении фона (регистрация цепочки  $^{212}\text{Bi}$ — $^{212}\text{Po}$ ) фон от распада  $^{208}\text{Tl}$  в области  $Q_{\beta\beta}$  ( $1\sigma$ ) составит  $\sim 10$  распадов в день. На рис. 7 в качестве иллюстрации приведен ожидаемый спектр электронов в случае реализации детектора, содержащего 12 т сцинтиллятора, для массы нейтрино 100 мэВ.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан Nd-содержащий сцинтиллятор с высокими оптическими и сцинтилляционными параметрами. Реализация полномасштабного детектора, содержащего 12 т сцинтиллятора, даст возможность исследовать область эффективных масс майорановского нейтрино на уровне  $\sim 50$ – $100$  мэВ. Это позволит подтвердить или опровергнуть результат работы [18], в которой объявлено о наблюдении положительного эффекта при измерении  $0\nu\beta\beta$ -распада  $^{76}\text{Ge}$  для массы  $> 170$  мэВ.

Авторы выражают благодарность Frank Calaprice и Daniele Montanino за плодотворное обсуждение проблемы регистрации безнейтринного двойного  $\beta$ -распада с помощью жидких органических сцинтилляторов, а также Matthias Laubenstein за его помощь в измерении образцов Nd на полупроводниковом HPGe-детекторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), а также гранта РФФИ 09-02-92423-КЭ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klapdor-Kleingrothaus H.V., Dietz A., Baudis L. et al. // Eur. Phys. J. 2001. V. A12. P. 147.
2. Ohsumi H. for NEMO and SuperNEMO Collaboration // Journal of Physics: Conference Series. 2008. № 120. P. 052054.
3. Chen M.C. for the SNO + collaboration // 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2008). Philadelphia, Pennsylvania, 30 Jul–5 Aug 2008. www.slac.stanford.edu/econf/co80730
4. Артемьев В.А., Брахман Э.В., Васильев С.И. и др. // Ядерная физика. 1996. Т. 59. № 1. С. 10.
5. Arnold R., Barabash A., Blum D. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A354. P. 338.
6. Argyriades J., Arnold R., Augier C. et al. // arXiv:hep-ex/0810.0248.
7. Hwang M.J., Kwon Y.J., Kim H.J. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A 570. P. 454.
8. Gehman V.M., Doe P.J., Robertson R.G.H. et al. // arXiv: 0911.2198.
9. Miramonti L. // arXiv:hep-ex/0206063 v1.
10. Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Корпусов Г.В. и др. // Радиохимия. 2003. Т. 45. № 2. С. 128; BUCK S., Barabashov I., Besida O. et al. // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.). 2005. V. 143. P. 487; Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Цивадзе А.Ю. и др. // Радиохимия. 2008. Т. 50. № 3. С. 236; Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Цивадзе А.Ю. и др. // Радиохимия. 2009. Т. 51. № 3. С. 239.
11. Elisei F., Gatti F., Goretti A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. V. A400. P. 53.
12. Alimonti A., Arpesella C., Balata M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A440. P. 360.
13. Arpesella C., Back H., Balata M. et al. // Astroparticle Physics. 2002. V. 18. P. 1.
14. Alimonti G., Anghloher G., Arpesella C. et al. // Astroparticle Physics. 1998. V. 8. P. 141.
15. Alimonti G., Arpesella C., Back H. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A600. P. 568.
16. Бабичев А.П., Григорьев И.С., Григорьев А.И. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 10. С. 879.
17. Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Жиров В.И. и др. // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 3. С. 229.
18. Klapdor-Kleingrothaus H.V., Krivishina L.V. // Mod. Phys. Lett. 2006. V. A21. P. 1547.