

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



**И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,
Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, Б.К. Лубсандоржиев,
С.Б. Лубсандоржиев, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,
А.Ю. Сидоренков, В.В. Синев, Е.А. Янович**

**Прототип большого сцинтилляционного
детектора геонейтрино на БНО**

препринт
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1419/2016
ФЕВРАЛЬ 2016

МОСКВА 2016 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



**И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,
Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, Б.К. Лубсандоржиев,
С.Б. Лубсандоржиев, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,
А.Ю. Сидоренков, В.В. Синев, Е.А. Янович**

Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1419/2016
ФЕВРАЛЬ 2016

препринт
preprint

МОСКВА 2016 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,
Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов, Б.К. Лубсандоржиев,
С.Б. Лубсандоржиев, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,
А.Ю. Сидоренков, В.В. Синев, Е.А. Янович

Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН

1419/2016

ФЕВРАЛЬ 2016

МОСКВА

2016

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

УДК 539.12;550.35;550.36;550.42

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков,
А.В. Вересникова, Ю.М. Гаврилюк,
А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов, В.В. Казалов,
С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов,
Б.К. Лубсандоржиев, С.Б. Лубсандоржиев,
В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,
А.Ю. Сидоренков, В.В. Синев, Е.А. Янович

Прототип большого сцинтилляционного детектора геонейтрино на БНО

В 2005 г. в рамках развития научной программы БНО был предложен проект создания на БНО ИЯИ большого сцинтилляционного детектора (~10 кт). Создание такого детектора долговременная и дорогостоящая задача, и она не может быть решена без предварительного создания экспериментального модуля меньшего масштаба. На этом экспериментальном модуле будут решены все методические задачи, которые необходимы для проектирования и создания полномасштабного детектора. Помимо методических задач на таком модуле могут быть решены и актуальные научные задачи: например, исследование содержания радиоуглерода (изотоп ^{14}C) в составе различных сцинтилляторов с высокой чувствительностью. Описана конструкция модуля, место размещения. Рассчитано ожидаемое ослабление фона от внешнего гамма излучения. Дана оценочная стоимость модуля.

ISBN 978-5-94274-307-9

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2016
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2016

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,
Ю.М. Гаврилюк, А.М. Гангапшев, В.И. Гуренцов,
В.В. Казалов, С.Д. Крохалева, В.В. Кузьминов,
Б.К. Лубсандоржиев, С.Б. Лубсандоржиев,
В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова, А.Ю. Сидоренков,
В.В. Синев, Е.А. Янович

Прототип большого сцинтилляционного
детектора геонейтрино на БНО

Препринт 1419/2016

Февраль 2016

Подписано в печать 02.02.2016

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,3. Зак. 22378 Тираж 60 экз.
Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

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

Введение

Нейтринная астрофизика — в настоящее время бурно развивающийся раздел астрофизики. Нейтрино, благодаря слабому взаимодействию с веществом, может выходить из объектов не прозрачных для других видов излучения и, следовательно, может дать важную информацию о процессах внутри них.

Кратко сформулируем основные направления исследований в области нейтринной астрофизики, проводимые в настоящее время:

1. Исследование внутреннего строения Солнца.
2. Исследование гравитационного коллапса массивных звезд.
3. Поиск нейтрино от объектов, в которых, по-видимому, происходит ускорение космических лучей, таких как бинарные звездные системы, туманности, образовавшиеся после взрыва сверхновых звезд, ядра активных галактик, источники γ -всплесков.
4. Поиск темной материи с помощью нейтрино.
5. Исследование нейтринных осцилляций, использующее в качестве источника атмосферные нейтрино или солнечные нейтрино.
6. Исследование темпа формирования массивных звезд в ранние эпохи по диффузному потоку нейтрино от всех гравитационных коллапсов
7. Поиск нейтрино из недр Земли (геонейтрино).

Последний раздел и представляет область нашего интереса

В 2005 г в рамках развития научной программы БНО был предложен проект создания на БНО ИЯИ большого сцинтилляционного детектора (~ 10 кт). [1]

1. Одной из основных задач детектора будет регистрация (анти) нейтрино (геонейтрино) от распада радиоактивных элементов в недрах Земли. Регистрация геонейтрино тесно связана с проблемой происхождения теплового потока из центра Земли, которая является одной из наиболее интересных и важных задач современной геофизики и астрофизики. Первые экспериментальные данные по регистрации геонейтрино к настоящему времени получены установками Борексина и Камленд. [2,3] Однако эти данные не позволяют сделать однозначный выбор между различными моделями строения и происхождения Земли [4,5] и показали необходимость создания новых установок большего масштаба. Кроме того полное решение этой проблемы требует измерение потока

геонейтрино в различных точках земной поверхности и даже если такой детектор войдет в строй позже аналогичных детекторов в других странах, его значимость не будет потеряна, поскольку им будет исследована часть земной поверхности, недоступная другим детекторам.

2. Помимо задачи исследования геонейтрино детектор будет предназначен для решения всех современных задач нейтринной астрофизики низких энергий:

- Детального исследования солнечных нейтрино, Задача исследования низкоэнергетических солнечных нейтрино (от PP-реакции, ${}^7\text{Be}$, PEP реакции и CNO-цикла только начата на детекторе Борексино и проведение этих исследований на детекторе большей масс и в условиях меньшего фона позволит получить эти результаты с существенно большей статистической точностью. Особо следует отметить поиск нейтрино от CNO-цикла, знание которого важно для понимания внутреннего строения и эволюции звезд. В эксперименте Борексино этот нейтринный поток пока выделить не удастся из-за фона космического излучения. В подземной камере на БНО фон космических лучей примерно на порядок ниже и решение этой задачи легче. [6]
- Регистрация нейтрино от сверхновых нашей и ближайших галактик. Детектор большого объема позволит детально изучить спектр излучаемых нейтрино и получить сведения о деталях механизма взрыва сверхновых. Кроме того наличие сети таких детекторов с большой массой позволит определить направление на сверхновую в том случае, если оптическая вспышка не видна. Анализ этих данных в рамках теории нейтринных осцилляций в веществе может дать сведения о распределении плотности внутри Земли.
- Регистрация потока нейтрино от сверхновых за всю историю Вселенной, позволит дать оценку полной массе, содержащейся в сколлапсировавших объектах. Эта задача была впервые поставлена в диссертации Г.В Домагацкого, и широко обсуждалась после опубликования. [7]

3. Помимо научных задач детектор будет иметь интересные прикладные задачи, например при наличии сети подобных детекторов бу-

дет возможно решить важную для МАГАТЭ задачу контроля работы реакторов отдельных стран.

Обоснование предварительно создания экспериментального модуля

Создание такого детектора долговременная и дорогостоящая задача и она не может быть решена без предварительно создания экспериментального модуля меньшего масштаба.

Задачи модуля:

- Разработка и испытание основных элементов полномасштабного детектора
- Измерение чистоты сцинтиллятора с чувствительностью на уровне 10^{-16} U, Th (г/г)
- Исследование различных методов очистки сцинтиллятора от радиоактивных примесей.
- Разработка конструкции фотодетектора, расположенного в жидкостной среде.
- Разработка электронного канала съема и записи информации с фотодетектора
- Выбор материала и конструкции центрального сцинтилляционного детектора
- Исследование долговременной стабильности сцинтиллятора и совместимости с материалом контейнера.
- Исследование различных сцинтилляторов

Помимо методических задач на таком модуле могут быть решены и актуальные научные задачи: - например исследование содержание радиоуглерода (изотоп ^{14}C) в составе различных сцинтилляторов с высокой чувствительностью. Поиск сцинтилляторов с низким содержанием радиоуглерода важен с точки зрения создания сцинтилляционных детекторов с низким фоном в области низких энергий (<100 кэВ, например детекторов РР солнечных нейтрино). С другой стороны содержание радиоуглерода в различных органических сцинтилляторах даст возможность получить сведения о возрасте и происхождении различных нефтяных месторождений.

1. Конструкция модуля

Общая идея конструкции модуля будет аналогична другим современным установкам подобного типа – центральный сцинтилляционный детектор, просматриваемый фотоумножителями через слой чистой жидкости (воды), обеспечивающей защиту детектора от гамма излучения горных пород, фотоумножителей и конструкционных материалов внешнего бака. Конструкция модуля позволит исследовать свойства сцинтиллятора, с помощью которых можно характеризовать возможности полномасштабного детектора с точки зрения таких важных параметров как:

- Энергетическое разрешение
- Пространственное разрешение
- Форма импульса

Выбор размеров модуля

Геометрические размеры выбираются из нескольких противоречащих друг другу требований:

- Возможность создания модуля в подземном помещении БНО в ближайшие несколько лет, учитывая современные финансовые ресурсы.
- Возможность выбора достаточно простой технологичной конструкции центрального сцинтилляционного детектора, изготовленного из чистого (низкое содержание радиоактивных примесей) прозрачного материала.
- Возможность решения с его помощью выше сформулированных задач
- Обеспечение достаточной пассивной защиты центрального детектора от гамма излучения горных пород.

В качестве компромисса рассмотренных выше требований выбрана конструкция, схематически представленная на рис 1.

Внешний цилиндрический корпус из нержавеющей стали имеет размеры: высота 3 м и диаметр 3 м и толщиной стенки ~ 8 мм. Фотоумножители типа Hamamatsu R5912, 8” на первой стадии покрывают 20% поверхности и расположены на отдельной стальной ферме, установленной внутри бака с водой и служащей также для вывода кабелей сигнальных и питания с фэу. Всего требуется 60 ФЭУ. Внутренняя

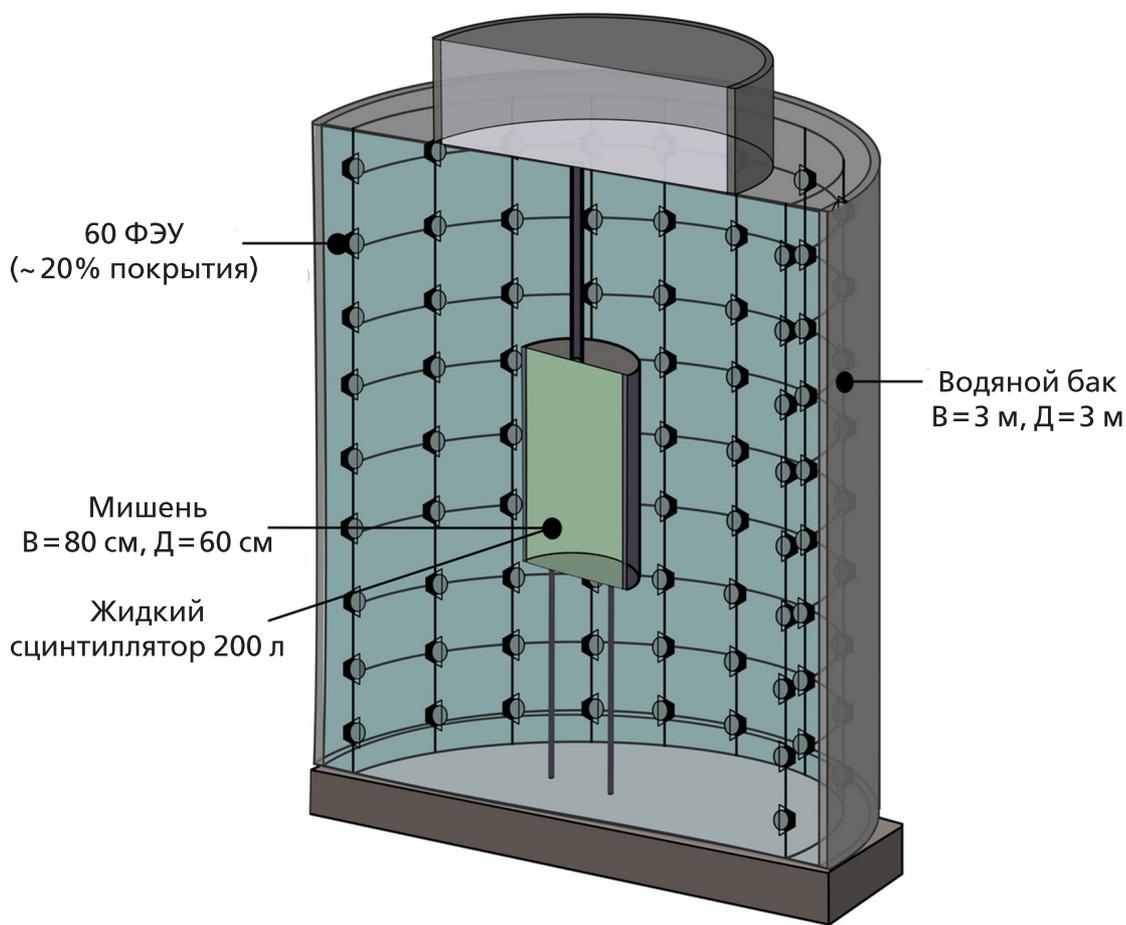


Рис.1. Конструкция модуля

поверхность стального бака, с целью улучшения светосбора, будет покрыта отражающим материалом (Tivek). Плёнка Tivek (600 мкм) обладает высокой отражающей способностью > 95%, для длин волн > 300 нм. В дальнейшем планируется увеличить число фэу для улучшения энергетического разрешения детектора. Также, в дальнейшем планируется рассмотреть технологию изготовления центрального детектора цилиндрической формы с полусферической верхней и нижней частью. Данная конструкция делает детектор более надёжным с точки зрения прочностных характеристик и позволяет рассмотреть технологию их изготовления для более крупных детекторов.

Внутренний сцинтилляционный детектор цилиндрической формы имеет размеры высота 80 см и диаметр 60 см и изготавливается из органического стекла. Выбор размеров обусловлен сравнительно простотой технологией его изготовления с использованием промышленных труб из

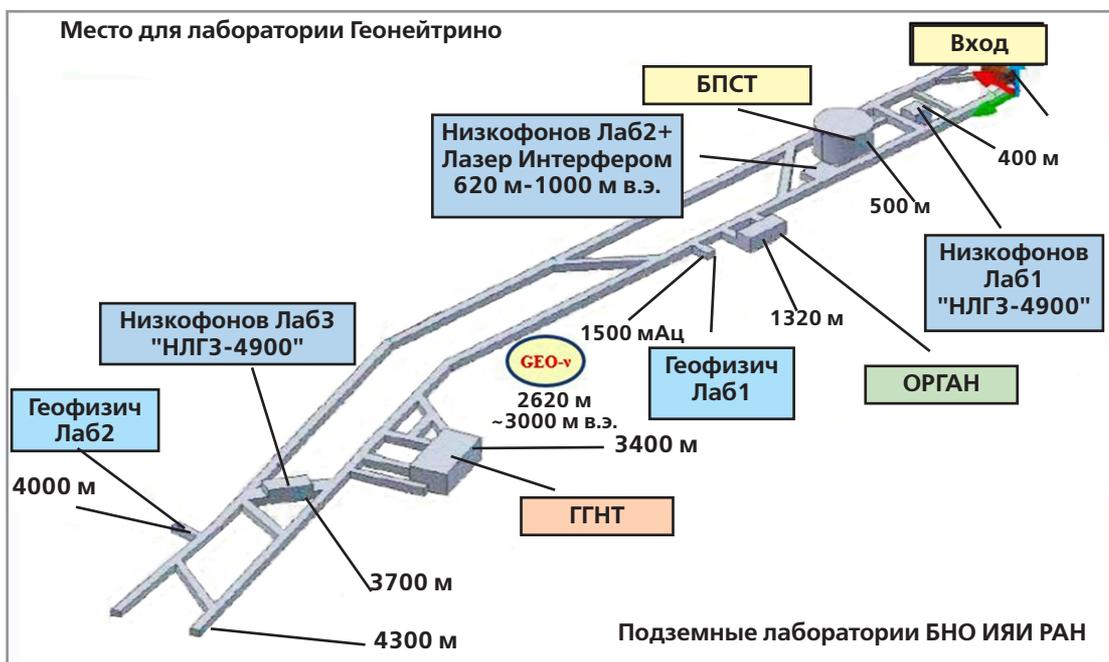


Рис.2. Место размещения модуля



Рис.3. Место для лаборатории Геонейтрино.
Фотография полости на глубине 2620 м

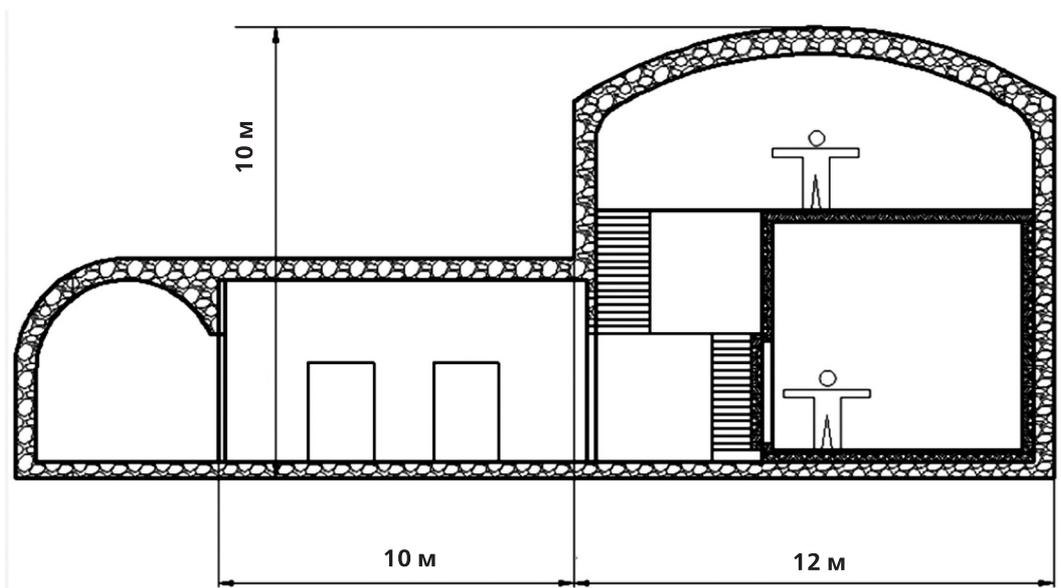


Рис.4. Схематический вид лаборатории Геонейтрино

прозрачного оргстекла, толщиной 7 мм. Выталкивающая сила составляет не более 40 кг и не представляет проблем для крепления. Толщина водной защиты обеспечивает снижение основного источника фона горных пород — гамма линии ^{208}Tl (2,6 МэВ) - в 150 раз. Стоимость его изготовления с учетом материала составляет ~ 200 000 руб. (в ценах первой половины года).

Конструкция модуля предусматривает возможность подсоединения систем очистки сцинтиллятора и воды для проведения непрерывной циркуляции органической и водной фаз.

Центральная труба, соединяющая сцинтилляционный детектор с верхом бака, будет использована для проведения калибровочных измерений (светодиод, альфа и гамма источники разных энергий).

2. Место размещения модуля

Для выполнения проекта предполагается построить новый комплекс специализированных подземных помещений. Одно из возможных мест размещения модуля является выработка на расстоянии 2620 м от входа. Планируется ввод ее в строй в 2017 году. Будут рассмотрены и другие варианты места размещения.

3. Сцинтиллятор

Центральный детектор, объемом 200 л, будет заполнен жидким органическим сцинтиллятором на основе ЛАБа с добавками РРО (2 г/л) и bis-MSB (50 мг/л). Поскольку в полномасштабном эксперименте будет использовано десятки килотонн жидкого органического сцинтиллятора, прозрачность жидкости имеет очень существенный фактор, улучшающий энергетическое разрешение детектора. Добавка шифтера bis-MSB позволяет сместить эмиссионные фотоны в длинноволновую область спектра (макс. ~ 425 нм). В этой области поглощение света мало (bis-MSB не поглощает при длинах волн больше 430 нм) и фотоны испытывают в основном только релеевское рассеяние.

Основными характеристиками сцинтилляционного детектора, которые в основном определяют возможности эксперимента, являются: световой выход, прозрачность, время высвечивания, форма импульса в зависимости от источника сцинтилляций, а также внутренний фон, связанный с содержанием радиоактивных примесей. Поскольку такого типа эксперименты являются крупномасштабными и долговременными, стабильность сцинтилляционных параметров должна быть высокой.

3.1. Сцинтиллятор. Состав

Для модуля в качестве жидкого органического сцинтиллятора выбран состав на основе линейного алкил бензола (растворитель) с добавками РРО (2 г/л) и bis-MSB (20 мг/л). Линейный алкил бензол – это жидкость с T (кип.) — 143°C , плотностью 0.856 г/л, представляющая собой смесь углеводородов с общей формулой $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$. Будет использован ЛАБ российского производства (КИНЕФ, Кириши). Состав ЛАБа (КИНЕФ) включает четыре группы алкилбензолов: $\text{C}_{16}\text{H}_{26}$ – 0.125, $\text{C}_{17}\text{H}_{28}$ – 0.293, $\text{C}_{18}\text{H}_{30}$ – 0.315, $\text{C}_{19}\text{H}_{32}$ – 0.267, каждая из которых присутствует в виде смеси изомеров.

3.2. Сцинтиллятор. Световыход

Измеренный световыход составил 76% относительно сцинтиллятора на основе РС (1.5 г/л РРО), т.е. ~ 8000 фотон/МэВ. Для достижения высокого энергетического разрешения ($\sim 4\%$ $E = 1$ meV) планируется достичь хорошего светосбора за счёт увеличения числа фэу и покрытия светоо-

тражающей плёнкой. Выбранные концентрации PPO (2 г/л) и bis-MSB (20 мг/л) в ЛАБе получены на основании измерений величины световыхода от концентраций сцинтилляционных добавок. Показано, что при больших концентрациях световыход существенно не увеличивается, а самопоглощение фотонов растёт. К тому же растворимость в ЛАБе для больших концентраций добавок снижается.

3.3. Сцинтиллятор. Прозрачность

Высокая прозрачность сцинтиллятора для крупномасштабных детекторов является одной из наиболее важных характеристик. Эмиссионные фотоны при своём распространении к фотоприёмникам могут либо поглотиться, либо рассеяться. Рассеянные фотоны не теряются, они просто меняют направление и таким образом оказывают влияние на пространственное разрешение детектора и усложняют анализ по форме импульса. Создание прототипа детектора позволит экспериментально исследовать влияние рассеяния на форму регистрируемых фотоумножителями импульсов. Поглощение света возможно либо на органических примесях, либо на сцинтилляционных добавках (PPO, bis-MSB). В случае сцинтилляционных добавок поглощенный свет, с вероятностью $\sim 98\%$, переизлучается и результирующий спектр смещён в длинноволновую область. В общем случае прозрачность (длина поглощения) определяется суммой процессов поглощения, поглощения-реэмиссии и рассеяния. Рассеяние (Рэлеевское), связанное с рассеянием фотонов на молекулах растворителя, зависит от соотношения энергии фотонов и размеров молекул ЛАБа.

Были проведены измерения прозрачности различных образцов ЛАБа.[8] Для анализа был использован спектрофотометр Perkin Elmer Lambda 35 с кварцевыми кюветами длиной 10 см. Результаты измерения показали, что прозрачность ЛАБа после очистки на оксиде алюминия, составила ~ 15 м (430 нм).

Планируемые на модуле методы очистки включают: сорбционную хроматографию на окиси алюминия, ультрафильтрацию (0.05 мкм) и жидкостную экстракцию.

Отдельно будет осуществлена процедура очистки сцинтилляционных добавок PPO и bis-MSB. PPO и bis-MSB - органические соединения, которые с течением времени реагируют с кислородом воздуха.

Образовавшиеся новые соединения могут влиять на прозрачность жидкого сцинтиллятора.

3.4. Сцинтиллятор. Содержание радиоактивных примесей

Одна из главных проблем при создании детектора, предназначенного для детектирования редких нейтринных событий, это подавление фона. Фоновые события могут быть вызваны космическими лучами, внешней радиоактивностью и внутренней радиоактивностью детектора. Для защиты от космических лучей детектор размещается глубоко под землей и для подавления внешнего радиоактивного фона (гамма кванты, нейтроны) от окружающих горных пород окружается защитой (водой). Внутренний радиоактивный фон находится внутри детектора и поэтому требует тщательной селекции используемых конструкционных материалов, фотодетекторов и сцинтиллятора.

В таблице 1 представлены концентрации радиоактивных элементов, которые в среднем распространены в природе и уровень, до которого их надо снизить, чтобы они стали приемлемы для создания низкофонового сцинтиллятора.

Таблица 1. Радиоактивные примеси в жидких сцинтилляторах

Радиоактивные примеси	В природе Типичная концентрация	В сцинтилляторе Приемлемый уровень	Способы уменьшения
^{14}C	$R(^{14}\text{C}/^{12}\text{C}) - 10^{-12}$	$R(^{14}\text{C}/^{12}\text{C}) - 10^{-18}$	Использовать растворители со “старым углеродом”.
^7Be	$3 \times 10^{-2} \text{Bq/г-углерода}$	$< 10^{-6} \text{Bq/г-углерода}$	Дистилляция, или хранение под землей
^{238}U	$2 \times 10^{-5} \text{г/г-пыль}$	$< 10^{-16} \text{г/г в сцинтилляторе}$	Водная экстракция, Дистилляция
^{40}K	$2 \times 10^{-6} \text{г/г пыль}$ и в РРО	$< 10^{-13} \text{г/г в сцинтилляторе}$ $< 10^{-11} \text{г/г в РРО}$	Водная экстракция раствора РРО
^{222}Rn	100 атомов радона/ см^3 -воздуха	1 атом радона/т сцинтиллятора	Продувка азотом
$^{39}\text{Ar}, ^{42}\text{Ar}$	1Bq/м^3 воздуха		Продувка азотом
^{85}Kr	1Bq/м^3 воздуха		Продувка азотом
^{210}Pb	Загрязнение поверхности от продуктов распада радона		Анализ событий (Пространственное разрешение)

Из таблицы видно, что необходимый уровень чистоты по радиоактивным примесям очень высок и как следствие его анализ представляет крайне трудную задачу. Существующие на данном этапе лабораторные аналитические методы (т.е. методы анализа с использованием небольших количеств образца) позволяют определять концентрации порядка 10^{-12} г/г по U, Th.

В таблице 2 представлены результаты анализа содержания U, Th, K в ЛАБе и псевдокумоле (РС) с использованием ICPMS и NA.

Таблица 2. Содержание U, Th, K в ЛАБе и псевдокумоле

Образец	Условия очистки	Элемент и метод анализа	Концентрация г/г	Прозрач. L_{420nm} м
ЛАБ (Россия)	Не очищен	U (ICPMS) Th (ICPMS)	$<2 \times 10^{-13}$ $<1 \times 10^{-13}$	12
РС (СТФ)	Не очищен	U,Th (ICPMS)	$<5 \times 10^{-12}$	3,1
РС (СТФ)	Водная экстр.	U,Th (ICPMS)	$<5 \times 10^{-12}$	3,3
РС (СТФ)	Дистилляция	U,Th (ICPMS)	$<1 \times 10^{-12}$	7,4
РРО	Не очищен	K(NA)	2×10^{-6}	
РРО	Водная экстр.	K(NA)	$<1 \times 10^{-8}$	
РХЕ+рТР СТФ	Не очищен	U (NA)	$3,2 \times 10^{-14}$	3
РХЕ+рТР СТФ	Очищен на силикагеле	U (NA)	1×10^{-17}	12

По результатам, представленным в таблице видно, что анализ проб на уровне 10^{-16} г/г по U, Th можно осуществить, только с помощью нейтронно-активационного анализа (НА).

Для демонстрации применения возможных методов очистки сцинтиллятора от радиоактивных примесей была использована методика с внесением в качестве метки в сцинтиллятор радиоактивных изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K . [9]

Для удаления урана и тория из ЛАБа были испробованы следующие методы:

1. Реэкстракция деионизованной, водой.
2. Сорбция на оксиде алюминия и кремния.
3. Осаждение урана и тория в виде комплекса с АМДФ (аминометиленидифосфоновая кислота).

Для удаления калия из ЛАБа использовались:

1. Реэкстракция деионизованной водой.
2. Осаждение в виде комплекса с тетрафенилборатом (ТРВ).

Кроме того была исследована возможность очистки готового сцинтиллятора (с введёнными сцинтилляционными добавками) на оксиде алюминия и силикагеле. Отдельно исследовалась очистка РРО.

Сорбция на оксиде алюминия и кремния показала, что уран очень хорошо сорбируется на оксиде алюминия и не выходит с колонки вплоть до соотношения объемов 1: 33. Торий хорошо сорбируется как на оксиде алюминия, так и на силикагеле при соотношении объемов не более, чем 1:11.

Проведённые исследования с использованием метода осаждения урана и тория в виде комплекса с АМДФК (аминометилендифосфовая кислота, $\text{NH}_2\text{CH}[\text{P}(\text{O})(\text{OH})_2]_2$, $M=191\text{г/моль}$) показали, что при соотношении объёмов 10:1 (орг./вод.) Концентрации U и Th уменьшаются соответственно в 10 и 40 раз.

Для очистки ЛАБа от калия использовался часто используемый метод осаждения в виде комплекса калия с тетрафенилборатом (ТРВ). Анализ показал, что эффективность очистки составила ~ 95%.

3.5. Очистка сцинтилляционных добавок

В таблице 3 приведены результаты очистки сцинтиллятора с добавками РРО и р-Тр на окиси алюминия.

Из таблицы видно, что РРО не выходит с колонки вплоть до 8-ой части, а р-терфенил начинает выходить уже с первой части и практически полностью выходит уже при соотношении объемов 1:6. Таким образом, если в качестве сцинтилляционной добавки использовать р-терфенил, то для очистки сцинтиллятора можно использовать окись алюминия.

В таблице 4 отдельно приведены о результаты очистки второй сцинтилляционной добавки (шифтера) bis-MSB в ЛАБе на окиси алюминия.

Таким образом, проведённые исследования показали, что в случае использования р-терфенила и bis-MSB в качестве сцинтилляционных добавок ЛАБа, очистка методом on-line, может быть применена.

3.6. Сцинтиллятор. Совместимость с конструкционными материалами и стабильность

Проведённые лабораторные испытания образцов сцинтиллятора на основе ЛАБа показали совместимость с конструкционными материала-

Таблица 3. Сорбция PPO и p-Tr на Al_2O_3

Образец	V мл	L_{420} м	LY%
ЛАБ с PPO (0,0065 моль/л) – исх.	1л	11,82	100
1 часть	96 мл	36,22	0
2 часть	100	23,14	0
3 часть	180	27,17	0
4 часть	104		0
5 часть	106	17,39	0
6-7-8 части	272	16,72	0
ЛАБ очищ. (1:6)		16,10	
ЛАБ с p-Tr (0,0065 моль/л) – исх.	1л	8,00	100
1 часть	95	33,44	61
2 часть	100	20,70	80
3-4-5 части	300	18,90	89
6 часть	105	19,76	94
7 часть	107	16,72	93
8 часть	160	15,00	97

Таблица 4. Сорбция bis-MSB на Al_2O_3

Образец	V мл	L_{420} м	LY%
ЛАБ с bis-MSB 30мг/л – не очищ	1л	4,72	100
1 часть	150	37,87	0
2 часть	200	16,72	41
3 часть	200	14,99	44
4 часть	260	8,36	67

ми оптических ячеек выполненных из оргстекла типа Plexiglas GS. Стабильность и совместимость сцинтиллятора на основе ЛАБа с оргстеклом продемонстрирована в таких крупных экспериментах, как Daya Bay и RENO. Также планируется использовать оргстекло в качестве конструкционной оболочки сцинтилляционного детектора в новых планируемых экспериментах SNO+ (1000 т.) и JUNO (20 кт).

3.7. Сцинтиллятор. Очистка от продуктов распада ^{222}Rn (^{210}Pb , ^{210}Po , ^{210}Bi).

По результатам таких уникальных экспериментов как Bogexino радон и продукты его распада являются наиболее опасными и наиболее трудноудаляемыми в процессе достижения низкого уровня фона в области энергий меньше 1 МэВ. Основными механизмами загрязнения сцинтиллятора радоном и его дочерними изотопами являются: диффузия радона через конструкционную оболочку детектора, эманация с поверхности стенок в результате распада примеси радия, а также его сорбция. Изотоп ^{210}Po распадается с вылетом альфа частиц с энергией 5.3 МэВ, но с учётом гашения в сцинтилляторе эквивалентная энергия составляет ~ 0.4 МэВ. ^{210}Bi , другой продукт распада ^{210}Pb распадается с вылетом бета частиц $E \sim 1$ МэВ. Для проверки возможной сорбции ^{210}Pb на стенках акрила и исследования различных методов очистки сцинтиллятора использована методика анализа с радиоактивным изо-

топом ^{212}Pb (бета распад, 10.6 час), который получается в результате распада ^{220}Rn (альфа распад, 56 сек.) относящегося к семейству ^{232}Th . Для проверки эффективности очистки были опробованы методы, основанные на сорбции Al_2O_3 и водной экстракции.

Для регистрации редких событий в области низких энергий (солнечные нейтрино, гео-нейтрино и т.д.) исключительно строгие требования предъявляются к чистоте органического сцинтиллятора на содержание радиоактивных примесей. Создание прототипа сцинтилляционного детектора с массой 200 литров и размещение его в низкофоновом подземном помещении позволит исследовать фон, его стабильность, влияние различных методов очистки, а также провести анализ событий по форме импульса.

4. Модуль. Система очистки сцинтиллятора.

Система очистки сцинтиллятора включает использование методов хроматографии, водной экстракции и барботирования азотом.

- Очистка с помощью окиси алюминия.
- Жидкостная экстракция.

Водная экстракция ЛАБа позволяет удалить примеси ионов металлов, особенно важно, таких как радиоактивных U, Th, K и др. Также некоторые полярные органические примеси могут перейти в водную фазу. Для водной экстракции будет использована цилиндрическая колонка, изготовленная из нержавеющей стали, заполненная мелкодисперсной насадкой (рис.5). Сцинтиллятор подаётся в экстракционную колонку снизу, а водная фаза сверху (плотность воды выше плотности сцинтиллятора 0.86 г/см^3). Экстракция осуществляется в зоне насадки, когда движущиеся противотоком органическая и водная фазы перемешиваются.

Барботирование азотом.

Барботирование сцинтиллятора азотом позволит удалить из жидкости кислород, который является гасителем сцинтилляций, и также влияет на химическую стабильность ЛАБа. Важной задачей барботирования является удаление растворённых радиоактивных газов ^{222}Rn , ^{85}Kr , которые создают фон детектора. Для барботирования будет использован азот, который будет предварительно очищен пропуском газа че-

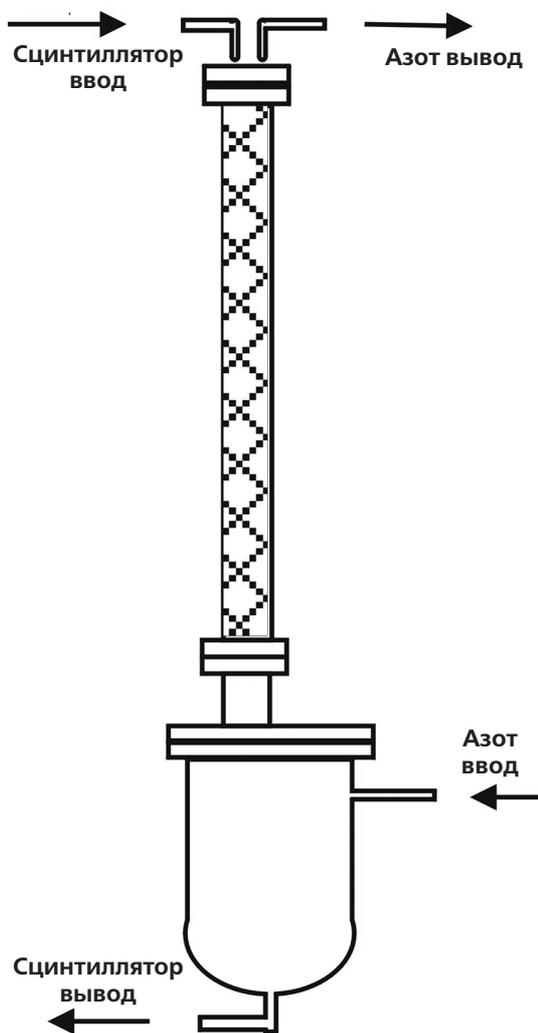


Рис.5. Колонка для жидкостной экстракции сцинтилятора



Рис.6. Принципиальная схема барботирования сцинтилятора

рез холодную ловушку ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$), заполненную активированным углём. Принципиальная схема системы барботирования изображена на рис.6.

5. Модуль. Система очистки воды

Модуль содержит 20 тонн ультрачистой воды, служащей для защиты центрального жидкого сцинтиляционного детектора от окружающей гамма радиоактивности. Будет использована непрерывная схема очистки вода, когда вода забирается из нижней части бака, пройдя систему очистки, возвращается обратно сверху в бак модуля. Скорость циркуляции воды будет достаточно низкой ~ 1 т/день (40 л/час), что позволит поддерживать температуру внутри бака постоянной.

Система очистки воды включает две основные процедуры – это ультрафильтрация (0.01 мкм) и барботирование азотом. Фильтрация удаляет возможные примеси твёрдых микрочастиц (пыли), которые могут содержать достаточно большие концентрации U, Th, K. После фильтрации вода проходит через систему обратного осмоса, которая позволяет удалить большинство содержащихся в воде ионов. В качестве исходной воды, может быть использована вода, которая получается для работ, связанных с функционированием эксперимента SAGE, лаборатория которого размещена рядом. Для поддержания качества воды на высоком уровне ($> 16 \text{ MOhm}$) периодически будет происходить замена фильтров. Барботирование удаляет радон, криптон, которые могут выделяться из стенок конструкций или диффундировать внутрь модуля через различные уплотнения.

Долговременные измерения характеристик сцинтиллятора (световой выход, энергетическое разрешение) проводимые на прототипе детектора позволят исследовать вопросы, связанные с совместимостью сцинтиллятора на основе ЛАБа с типом оргстекла используемого в качестве контейнера. Для приготовления сцинтиллятора будет использован ЛАБ производства Кириши, Россия, где технология его получения основана на методе с использованием HF кислоты (HF-acid method). Состав ЛАБа основанный на этом методе может отличаться от состава, полученного по другому, часто используемому методу solid acid catalyst.

**Емкости для приготовления сцинтиллятора
и транспортные емкости для дистиллированной воды.
Фотоумножители**

В качестве фотоумножителей для модуля выбраны фэу типа R5912 Hamamatsu 8” с сферическим фотокатодом, способные регистрировать единичные фотоэлектроны и обладающие довольно высокой квантовой чувствительностью 22% (390 нм). Уровень содержания радиоактивных примесей ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K для этой модели фэу составляет 153 ppb, 335 ppb и 18.5 ppb соответственно.

7.1. Система регистрации

Для измерения энергии частиц будет использован метод, основанный на суммировании зарядов, полученных в результате интегрирования импульсов за время ~ 300 нс на каждом из фэу. Интегрируются импульсы превышающие порог 0.25 ре. На последующей стадии, в перспективе создания полномасштабного детектора, планируется разработать систему регистрацию с использованием счёта единичных фотонов на каждом из фэу.

7.2. Питание фотоумножителей

Хорошая работа фотоумножителей требует стабильного высоковольтного напряжения. Полномасштабный детектор с несколькими тысяч фэу должен быть обеспечен системой соединения с кабелями питания и съёма информации. На модуле предлагается реализовать систему высоковольтного питания, основанную на применении преобразования низковольтного напряжения в высокое (Cockroft Walton). Это позволит значительно уменьшить число кабелей и стоимость всей системы.

8. Калибровка детектора

Для энергетической калибровки сцинтилляционного детектора будут использованы стандартные гамма источники ^{137}Cs (область низких энергий) и ^{40}K , ^{228}Th (область высоких энергий). Трубка с вставленным слабым источником света (LED) будет использована для проверки стабильности усиления фэу. В прототипе будет также предусмотрена возможность измерить отклик детектора от альфа и бета частиц с помощью специально введённых проб радиоактивных изотопов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{85}Kr . Проба сцинтиллятора в кварцевой ампуле, объёмом 20 мл, будет погружаться в центральный сцинтилляционный детектор. Все операции, связанные с калибровкой, будут осуществляться через специальный перчаточный бокс, установленный верхней части бака. В перспективе предполагается разработать калибровочный источник на основе ультрафиолетового лазера (высокая временная стабильность, \sim нс) с мониторингом интенсивности фотонов с помощью Si диода. Герметичность бака позволит избежать возможного попадания радона воздуха внутрь детектора.

9. Чистая комната

Для проведения работ, связанных с сборкой и монтажом отдельных узлов модуля (фэу и т.д.) необходима специальная чистая комната. Оборудованная система вентиляции и фильтрации воздуха позволит предотвратить попадание мелкодисперсных частиц пыли внутрь помещения. Для измерения содержания радона в воздухе будет собрана система концентрирования Rn из воздуха, включающая мембранный насос для прокачки воздуха последовательно через колонку с насыщенным водным раствором NaOH для поглощения углекислого воздуха, колонку с силикагелем (или сульфатом кальция) для поглощения паров воды и низкотемпературную угольную ловушку (этанол при температуре -114С). При этих условиях радон из воздуха будет сорбироваться на активированном угле, а кислород и азот свободно проходить не сорбируясь. Расход воздуха через систему ~ 200 ml/sec.

10. Ожидаемое ослабления фона от гамма излучения корпуса детектора

Рассчитан методом МК ожидаемый спектр фона от гамма излучения от распадов ^{238}U , ^{232}Th (в предположении равновесия с продуктами распада их радиоактивных рядов) и ^{40}K , находящимися, а корпусе детектора в качестве примесей. Число разыгранных событий 3×10^7 . Результаты представлены на рис.7, рис.8 и рис.9. Рассчитана вероятность регистрации гамма кванта в нейтринном детекторе, которая представлена в виде:

$$P_{\text{дет}} = P_{\text{сц}} \times P_{\text{погл}} \times P_{\text{геом}}$$

где:

$P_{\text{сц}}$ — вероятность того, что гамма квант, попавший в сцинтилляционную ячейку, даст сигнал;

$P_{\text{погл}}$ — вероятность того, что гамма квант поглотится в водяной защите;

$P_{\text{геом}}$ — вероятность того, что гамма квант попадет в сцинтилляционную ячейку от сферически симметричного источника.

Вероятность регистрации гамма кванта от ^{232}Th равна 2.90×10^{-4} /распад, ^{238}U – 2.85×10^{-4} /распад и от ^{40}K – 2.50×10^{-5} /распад. Фактор ослабления $P_{\text{погл}}$ гамма излучения от ^{238}U и ^{232}Th составляет $\sim 10^{-2}$ и $\sim 10^{-3}$ от ^{40}K .

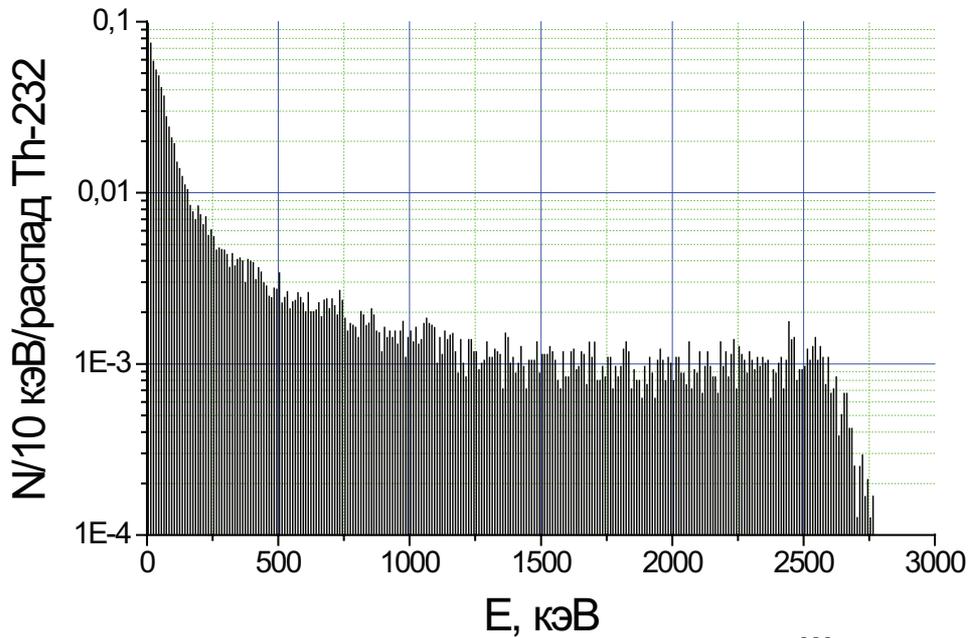


Рис. 7. Ожидаемый спектр фона в детекторе от гамма излучения ^{232}Th . Вероятность регистрации одного события равна 2.90×10^{-4} /распад. Вероятность регистрации одного события в области 0–200 кэВ равна 1.71×10^{-4}

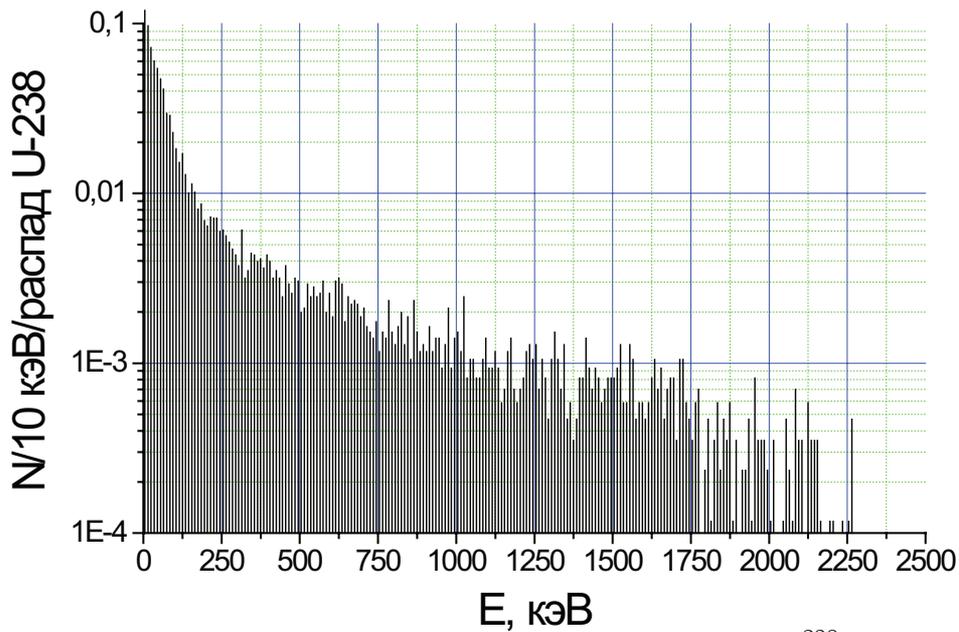


Рис. 8. Ожидаемый спектр фона в детекторе от гамма излучения ^{238}U . Вероятность регистрации одного события равна 2.85×10^{-4} /распад. Вероятность регистрации одного события в области 0–200 кэВ равна 1.97×10^{-4}

Примерно во столько же раз повышается чувствительность при измерении ^{14}C .

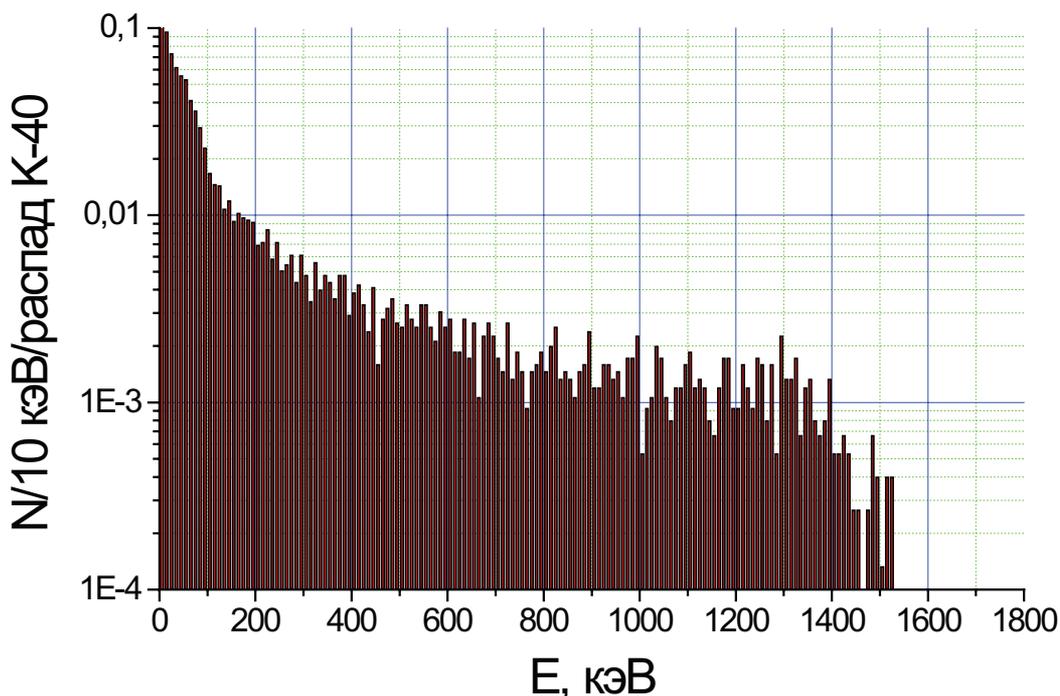


Рис. 9. Ожидаемый спектр фона в детекторе от гамма излучения ^{40}K . Вероятность регистрации одного события равна $2,50 \times 10^{-5}$ /распад. Вероятность регистрации одного события в области 0–200 кэВ равна $1,77 \times 10^{-5}$

11. Оценка стоимости модуля

Основные затраты

1. ФЭУ Hamamatsu R5912 (8»), сферический фотокатод Φ 202 мм 20% покрытия, Стоимость 130 шт. (с учётом скидки)— 16,3 млн. руб.
2. Нержавеющая сталь для корпуса толщиной 5 мм — 100 000 руб.
3. Электроника 2500 \$ (по данным Камленд) 250 000\$— 15 млн. руб.
4. Центральная ячейка — 200 000 руб.

Остальные затраты на производство монтажных работ, сцинтилляторы, химическое оборудование для очистки сцинтиллятора и воды, вспомогательные емкости и др. не превышают 5 млн. руб.

Окончательно стоимость модуля без учета работ по подготовке помещения составляет около 40 млн. руб.

Заключение

Описана конструкция экспериментального модуля, которую предполагается создать на БНО РАН в качестве прототипа полномасштабного

детектора геонейтрино. На этом экспериментальном модуле будут решены все методические задачи, которые необходимы для проектирования и создания полномасштабного детектора. Помимо методических задач на таком модуле могут быть решены и актуальные научные задачи: - например исследование содержания радиоуглерода (изотоп ^{14}C) в составе различных сцинтилляторов с высокой чувствительностью. Описана конструкция модуля, место размещения. Рассчитано ожидаемое ослабление фона от внешнего гамма излучения. Дана оценочная стоимость модуля.

Литература

- [1] Г.В.Домогацкий и др. ЯФ, 69 (2005), 43
- [2] Borexino, Physics Letters B v.722 (2013) 295–300
- [3] KamLAND, Phys. Rev. D 88, 2013
- [4] F. Mantovani et al. Phys.Rev. D 69:013001, 20
- [5] Larin V., Hydridic Earth, Polar Publishing, Canada, 1993
- [6] Borexino. Phys. Rev. D 89:11 (2014 Jun 25), pp. 112007.1-112007
- [7] Астрономический журнал т. 61 вып. 1, 51-52.
- [8] Л.Б.Безруков, Н.И.Бакулина, Н.С.Иконников, В.П. Моргалюк, Г.Я.Новикова, А.С.Чепурнов, Исследование прозрачности отечественного ЛАБа как растворителя для сцинтилляторов большого объема, препринт ИЯИ РАН 1382/2014, апрель 2014.
- [9] Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Вересникова А.В., Гуренцов В.И., Моргалюк В.П., Новикова Г.Я., Янович Е.А. Способ очистки жидкого органического сцинтиллятора на основе ЛАБа от микропримесей урана, тория и калия-40, препринт ИЯИ РАН, 1397/2015, февраль 2015.

Для заметок

