

**Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории  
ИЯИ РАН по изучению природных потоков нейтрино для целей гео- и  
астрофизики**

Проект

И. Р. Барабанов<sup>1</sup>, Л. Б. Безруков<sup>1</sup>, А. В. Вересникова<sup>1</sup>, Ю. М. Гаврилюк<sup>1</sup>,  
А. М. Гангапшев<sup>1</sup>, В. И. Гуренцов<sup>1</sup>, В. П. Заварзина<sup>1</sup>, В. В. Казалов<sup>1</sup>,  
С. Д. Крохалева<sup>1,2</sup>, В. В. Кузьминов<sup>1</sup>, А. С. Курлович<sup>1</sup>, В. Ю. Гришина<sup>1</sup>,  
Б. К. Лубсандоржиев<sup>1</sup>, С. Б. Лубсандоржиев<sup>1</sup>, А. К. Межох<sup>1</sup>, В. П. Моргалюк<sup>3</sup>,  
П. Ю. Наумов<sup>4</sup>, Г. Я. Новикова<sup>1</sup>, В. Б. Петков<sup>1</sup>, А. М. Пшуков<sup>1</sup>, В. В. Синев<sup>1</sup>,  
Ш. И. Умеров<sup>1</sup>, Е. А. Янович<sup>1</sup>, Т. Энквист<sup>5</sup>, П. Куусиниеми<sup>5</sup>,  
Й. Йутсенваара<sup>5</sup>, А. Виркайарви<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (Государственный университет), Москва, Россия.*

<sup>3</sup>*Институт элементоорганических соединений Российской академии наук им. А.Н. Несмеянова (ИНЭОС РАН), Москва, Россия,*

<sup>4</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва, Россия.*

<sup>5</sup>*Университет Оулу, Пихасалми, Финляндия,*

## Аннотация

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на Кавказе предлагается установить детектор большого объема, заполненный жидким сцинтиллятором. Масса мишени 10 кт. Детектор предназначен для регистрации природных потоков нейтрино низкой энергии (до 100 МэВ). В работе рассматриваются потоки нейтрино и оценивается ожидаемый эффект в предлагаемом детекторе. Проектирование и создание подобного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории будет являться частью мировой сети нейтринных детекторов по изучению природных нейтринных потоков.

## Введение

В последнее время активно обсуждается ряд проектов по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников [1-3]. Фундаментальной задачей является измерение потоков антинейтрино от бета-распадов изотопов естественных радиоактивных семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а также  $^{40}\text{K}$ , содержащихся в земных недрах. Надежная регистрация этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли. С другой стороны, рассматривается возможность регистрации нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами C, N, O и F, а затем позитронного распада образовавшихся ядер (так называемый цикл CNO), с помощью крупномасштабного жидко-сцинтилляционного детектора. 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 в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) [2]. Предполагаемая масса мишени детектора  $\sim 10$  кт. Географические особенности расположения обсерватории позволяют существенно подавить фон, связанный с потоками антинейтрино от работающих реакторов АЭС и в тоже время зарегистрировать потоки антинейтрино, несущие информацию о строении земной коры в данном регионе. В ряде статей уже рассматривалась возможность построения большого детектора в БНО [4-6]. Недавно появилось предложение построения детектора массой 4 кт в Китае [3] в предгорьях Гималаев.

Основные направления и цели предполагаемых исследований, относящихся к нейтринной геофизике и астрофизике:

1. Изучение потока антинейтрино, излучаемого дочерними продуктами распада урана и тория (геонейтрино), содержащимися внутри Земли, и определение, таким образом, радиогенной составляющей теплового потока Земли;
2. Оценка содержания калия внутри Земли по спектру электронов отдачи от рассеяния нейтрино на электронах (аналогично солнечным нейтрино);
3. Проверка гипотезы о протекании в центре Земли цепной реакции деления путем поиска потока антинейтрино “геореактора”;
4. Изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки;
5. Поиски изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и “черных дыр”;
6. Регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле энергетических ядерных реакторов. Изучение осцилляций электронных антинейтрино;
7. Исследование спектра солнечных нейтрино и поиск нейтрино от реакций CNO.

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 Borexino (лаборатория Гран-Сассо, Италия), благодаря достигнутому очень низкому радиоактивному фону удалось впервые зарегистрировать потоки солнечных  ${}^7\text{Be}$ , *pp* нейтрино [7], а в последнее время при использовании детального анализа спектра фона был получен поток 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  ${}^{14}\text{C}$ , присутствующего в молекулах углеводородов нефтяного происхождения. Максимальная энергия электрона отдачи от рассеяния *pp*-нейтрино ( $E_{\text{max}} = 420$  кэВ) в сцинтилляторе составляет 264 кэВ. Максимальная энергия  $\beta$ -распада  ${}^{14}\text{C}$  – 156.48 кэВ, но с учетом конечного энергетического разрешения (~ 10% в области 200 кэВ) и эффекта наложения импульсов от этого источника возможно появление событий с энергией более 200 кэВ. При этом надо отметить, что сцинтиллятор детектора Borexino имеет минимальное содержание изотопа  ${}^{14}\text{C}$ , по сравнению с измерениями в других сцинтилляторах. Отношение  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  для него составляет  $(2.69 \pm 0.06) \times 10^{-18}$  ( ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ ) [7].

Создание сцинтиллятора, не содержащего  ${}^{14}\text{C}$  или с сильно пониженным содержанием, позволит решить задачи 2 и 7 из предлагаемого списка с хорошей точностью.

Еще одной важной задачей, которую может решить большой детектор – это определение соотношения Th/U, которое известно из анализа хондритовых метеоритов и из более, чем 5000 проб, взятых на поверхности коры. Современное общепринятое значение составляет  $\text{Th}/\text{U} = 3.9$ . Вопрос состоит в том, отличается ли это значение внутри и на поверхности планеты? И если отличается, то с чем это связано?

В данной работе мы рассматриваем, как сцинтилляционный детектор с массой мишени 10 кт, построенный в Баксанской нейтринной обсерватории, сможет решать предлагаемые задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Michael Wurm et al. The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA, arXiv: 1104.5620 [astro-ph.IM].
2. И.Р. Барабанов, Г.Я. Новикова, В.В. Синев и Е.А. Янович, Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане, Препринт ИЯИ РАН 1228/2009.
3. John F. Beacom et al. Letter of Intent: Jinping Neutrino Experiment arXiv: 1602.01733.
4. Domogatsky G. V., Kopeikin V. I., Mikaelyan L. A. and Sinev V. V., ЯФ **68**, 70 (2005); hep-ph/0401221.
5. Домогацкий Г. В., Копейкин В. И., Микаэлян Л. А. и Синев В. В. ЯФ **69**, 46 (2006); hep-ph/0409069.
6. Домогацкий Г. В., Копейкин В. И., Микаэлян Л. А. и Синев В. В., ЯФ **70**, 1116 (2007); arXiv: 0705.1893 [hep-ph].
7. D. D'Angelo et al. Recent Borexino results and prospects for the near future, arXiv: 1405.7919 [hep-ex].

## СОДЕРЖАНИЕ

Баксанская нейтринная обсерватория . . . . .	8
Геонейтрино (уран-ториевые нейтрино, калиевые геонейтрино, реакторные нейтрино, геореактор) . . . . .	10
Солнечные нейтрино . . . . .	18
Нейтрино от вспышки сверхновой . . . . .	25
Диффузный нейтринный фон . . . . .	29
Конструкция детектора нейтрино . . . . .	32
Жидкий сцинтиллятор . . . . .	35
Заключение . . . . .	39

## Баксанская нейтринная обсерватория

Детектор для регистрации нейтрино предполагается разместить в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО). БНО обладает развитой инфраструктурой, базовым научным коллективом, рядом находится поселок для сотрудников. Здесь уже с конца 70х годов ведутся исследования космических лучей и солнечных нейтрино. Постройка детектора в таком месте потребует меньше средств, по сравнению с заново создаваемым комплексом лабораторий в необжитом месте.

Структура подземных лабораторий БНО показана на рис. 1. Для постройки детектора предполагается построить новый комплекс специализированных подземных помещений. Самое глубокое место находится за галлий-германиевым нейтринным телескопом (ГГНТ) (4900 м.в.э.), где и предполагается создавать детектор. На расстоянии 2620 м от входа находится небольшая выработка, в которой можно расположить макет будущего детектора и на нем отработать основные детали конструкции и методов регистрации (см. рис. 2).

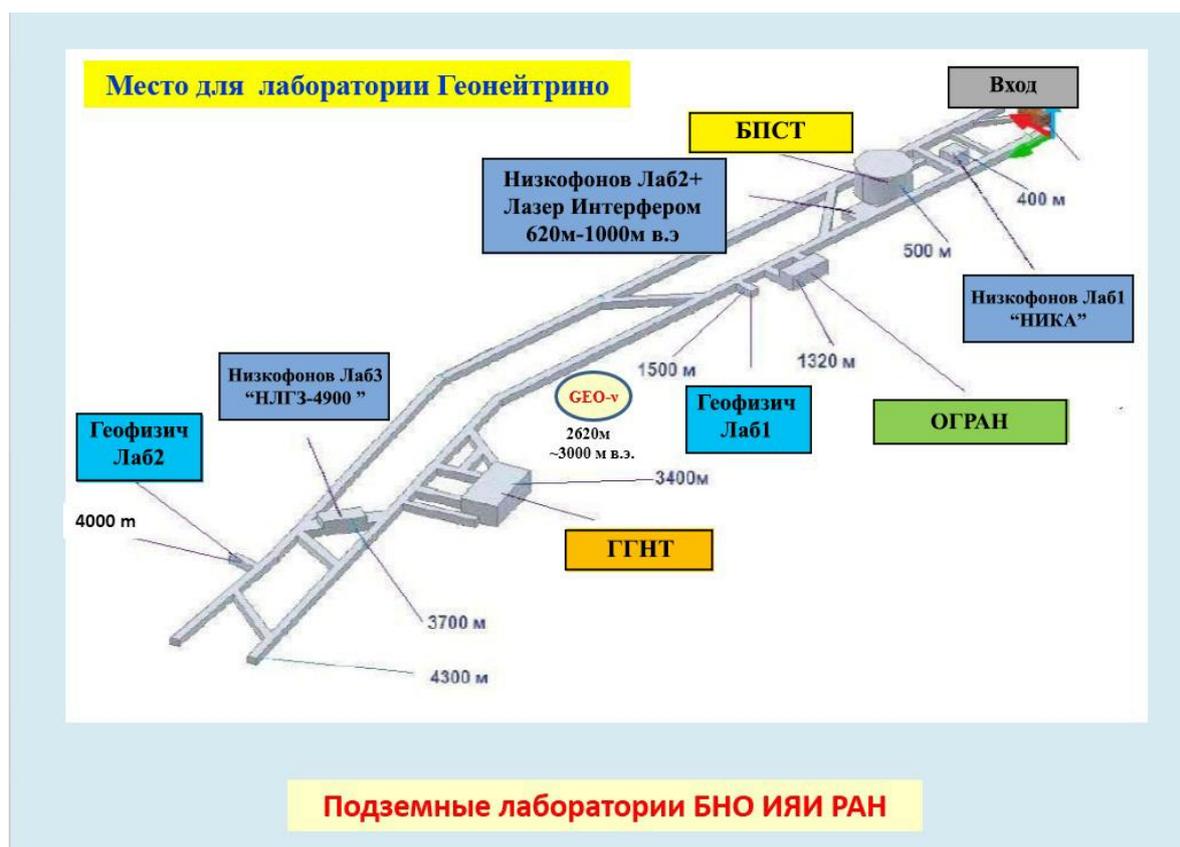


Рис.1. Комплекс подземных помещений БНО.

БНО имеет два параллельных тоннеля, обеспечивающих возможность эвакуации людей в случае нештатной ситуации. Доставка персонала к месту работы

осуществляется при помощи электрической дрeзины на аккумуляторах. Вдоль тоннеля расположены системы вентиляции и электроснабжения. Всего в подземных помещениях БНО располагается два крупных детектора: ГГНТ – галлий-германиевый нейтринный телескоп для регистрации солнечных нейтрино и БПСТ – Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп. Остальные помещения содержат небольшие установки и предназначены для выполнения различных низкофоновых измерений, это три низкофоновых лаборатории на различном удалении от входа, две геофизических лаборатории и гравитационная антенна (ОГРАН).



Рис. 2. Фотография полости в тоннеле на расстоянии 2620 м от входа.

Для постройки детектора с массой мишени 10 кт потребуется создать два больших зала. Один непосредственно для детектора, второй для приготовления, очистки и хранения жидкостей, наполняющих детектор. Сцинтиллятор желательно хранить под землей для уменьшения образующихся в нем радиоактивных изотопов под действием космических лучей. Третий, небольшой зал потребуется для установки регистрирующей аппаратуры и размещения сотрудников. Всего может потребоваться вынуть около 100 тыс. куб. м. грунта.

## Геонейтрино

### Уран-ториевые и калиевые нейтрино

Для объяснения тепла, исходящего из недр Земли, существуют различные гипотезы. Одно из объяснений это наличие радиоактивных элементов во внутренних областях Земли, которые выделяют энергию в виде альфа и бета излучения. Во время бета-распада происходит излучение нейтрино, которое выходит за пределы Земли и может быть обнаружено на поверхности. Это нейтринное излучение обычно называют геонейтрино.

К геонейтрино относят поток антинейтрино излучаемый радиоактивными изотопами с большими периодами полураспада, находящимися в недрах Земли. Основная часть геонейтрино производится изотопами радиоактивных рядов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Но имеется существенный вклад и от  $^{40}\text{K}$ , хотя по ряду оценок его доля в производстве тепла невелика. Есть еще ряд изотопов, как, например,  $^{87}\text{Rb}$  или  $^{235}\text{U}$ , но их количество и вклад в производство тепла Земли очень малы.

Энергетические спектры антинейтрино, испускаемые изотопами естественной радиоактивности, показаны на рис. 3.

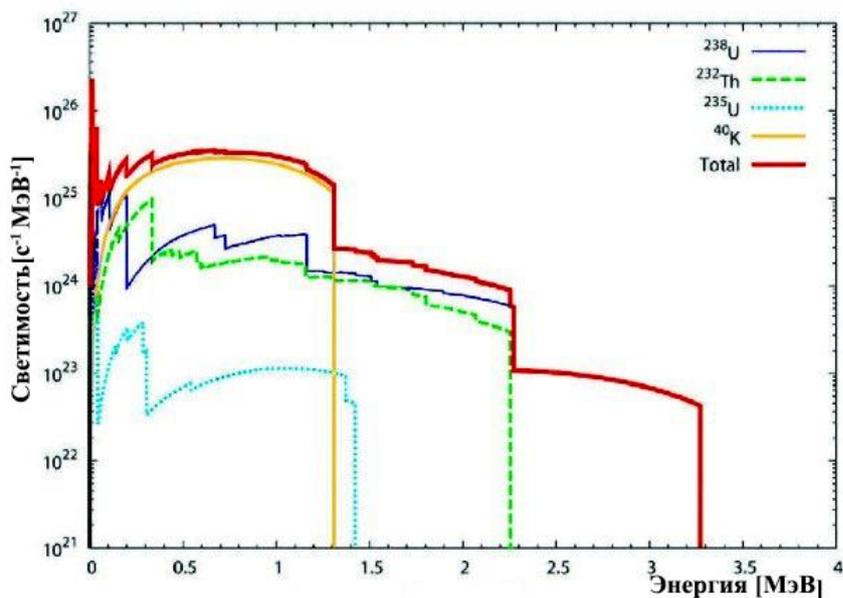


Рис. 3. Энергетические спектры антинейтрино, испускаемые изотопами естественной радиоактивности.

На основании сейсмических данных можно сказать, что Земля состоит из сферических слоев [1]. Внешний слой – это кора, которая состоит из тектонических плит и тонкой коры на океаническом дне. Толщина коры оценивается от 5-6 км на океаническом дне до 30-60 км в тектонических плитах. Часто кору представляют в виде сферического слоя толщиной 30-50 км. Далее выделяют верхнюю мантию,

простирающуюся до глубины 660-670 км от поверхности. От нее отделена тонким слоем нижняя мантия, которая идет до 2900 км. Затем расположено ядро, которое состоит из жидкого внешнего (2900-5150 км) и твердого внутреннего (глубже 5150 км).

Задача измерения геонейтрино состоит в определении количества изотопов и распределении их во внутренних слоях Земли. В детекторе, расположенном вблизи поверхности Земли, будут с большей эффективностью регистрироваться нейтрино из коры, чем из мантии, но объем мантии велик и общий вклад в скорость счета детектора могут составлять как раз нейтрино из мантии. Скорость счета детектора будет различна в разных местах поверхности Земли в зависимости от толщины коры в месте его расположения. Так, расчетами было показано [2–5], что скорость счета детектора на Гавайях будет около 13 TNU (1 TNU = 1 соб./10<sup>32</sup> протонов в год), а детектора на Баксане 55 TNU, при условии, что вклад мантии мал.

Согласно современным представлениям все радиоактивные изотопы сосредоточены в коре и мантии в соотношении примерно 50:50. Ядро не содержит радиоактивных элементов, по мнению большинства геохимиков. Это представление отражено в модели Bulk Silicate Earth (BSE) и основные предсказания потоков геонейтрино делаются на ее основе в рамках Reference Model [5].

Все расчеты показывают недостаточность производства тепла только радиоактивными элементами. Однако, в опубликованных расчетах не рассматривается в полной мере весь круг радиоактивных элементов. Обычно не учитывают вклад тепла от <sup>40</sup>K, предполагая, что его в Земле мало и он весь сосредоточен в коре. Тепловой поток также не известен в достаточной мере. Метод измерения температуры в шахтах глубиной 2-4 км ведется в основном на материках и в небольшой мере на шельфе. Полученная величина теплового потока оценивается в 47 ТВт с точностью 1- 2 ТВт [6]. Однако, при этом не учитывается косвенное измерение тепла из недр Земли по измерению температуры мирового океана. Данные, полученные этим методом, дают значение потока на порядок больше (~300 ТВт) [7].

Одной из задач измерения потока геонейтрино будет измерение потока антинейтрино от <sup>40</sup>K, вклад которого в тепловыделение может быть существенным, если он присутствует во внутренних слоях Земли в концентрации сравнимой с концентрацией в коре Земли (1.5-2%). Для регистрации потока геонейтрино от <sup>40</sup>K требуется сцинтиллятор на порядок более чистый, чем в детекторе Borexino по содержанию радиоактивных примесей и не содержащий <sup>14</sup>C.

В Японии и Италии в настоящее время уже ведутся измерения геонейтрино. Коллаборация KamLAND (Kamioka) начала измерения в 2002 г., а в 2005 г. впервые сообщила о наблюдении геонейтрино [5]. Они привели результат  $28^{+16}_{-15}$ , что соответствует  $57^{+33}_{-31}$  TNU и находится в согласии с предсказаниями модели BSE. Основные ограничения в точности эксперимента связываются здесь с большим неустраняемым фоном от окружающих реакторов, см. табл. 1. Для детектора BOREXINO (Gran Sasso) фон  $\bar{\nu}_e$  сравним с эффектом, однако сам эффект (5–7 событий в год) мал [8]. Вместе с тем, для решения вопросов теплового баланса Земли, изучения

вкладов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в радиогенное тепло, содержания урана и тория в коре и мантии и возможно в ядре требуется значимая статистика и спектральный анализ событий. Поэтому дальнейшее продвижение в исследовании геонейтрино связывают с новыми детекторами размера и класса KamLAND, но расположенными вдали от ядерных реакторов [9].

Регистрация потоков геонейтрино от урана и тория может вестись производиться стандартным методом по реакции обратного бета-распада на протоне



так как их энергетические спектры выходят за порог реакции 1.806 МэВ. Сечение реакции дается выражением

$$\sigma_{vp} = 9.55 \cdot 10^{-44} pE \quad (2),$$

где  $p$  и  $E$  – импульс позитрона и энергия антинейтрино. Наблюдаемый в детекторе спектр событий от геонейтрино урана и тория, получаемый путем регистрации позитронов от реакции обратного бета-распада (1) на протонах мишени показан на рис. 4.

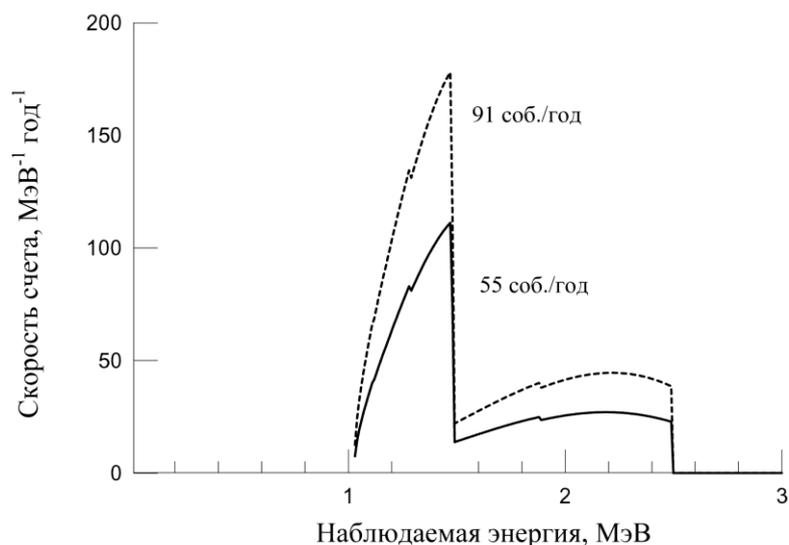
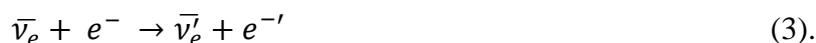


Рис. 4. Спектр геонейтрино, наблюдаемый в детекторе от урана и тория. Штриховая линия – спектр без осцилляций, сплошная с учетом осцилляций. Спектры рассчитаны для мишени  $10^{32}$  протонов.

Регистрация же потока от  $^{40}\text{K}$  может быть осуществлена только по реакции рассеяния нейтрино на электронах



Сечение реакции (3) дается выражением

$$\frac{d\sigma^w}{dT} = \frac{g_F^2}{\pi} m \left[ (1 + 2x^2)^2 \left(1 - \frac{T}{E}\right)^2 + 4x^2 - 2x^2(1 + 2x^2) \frac{mT}{E^2} \right] \quad (4),$$

где  $E$  и  $T$  – энергия антинейтрино и кинетическая энергия электронов отдачи,  $g_F^2 \frac{m}{\pi} = 4.308 \times 10^{-45} \text{ см}^2$ ,  $x^2 = \sin^2 \theta_W = 0.232$ .

Расчет спектра от  $^{40}\text{K}$  в предположении, что внутри Земли такое же содержание, как в коре [10], дает наблюдаемый эффект, сравнимый с эффектом от солнечных *pp* нейтрино. На рис. 5 показана полоса эффекта от спектра геонейтрино  $^{40}\text{K}$ . Нижняя граница отвечает содержанию только в коре (2% в коре и 0 в остальной части Земли), а верхняя – максимально возможному содержанию в Земле (4%) .

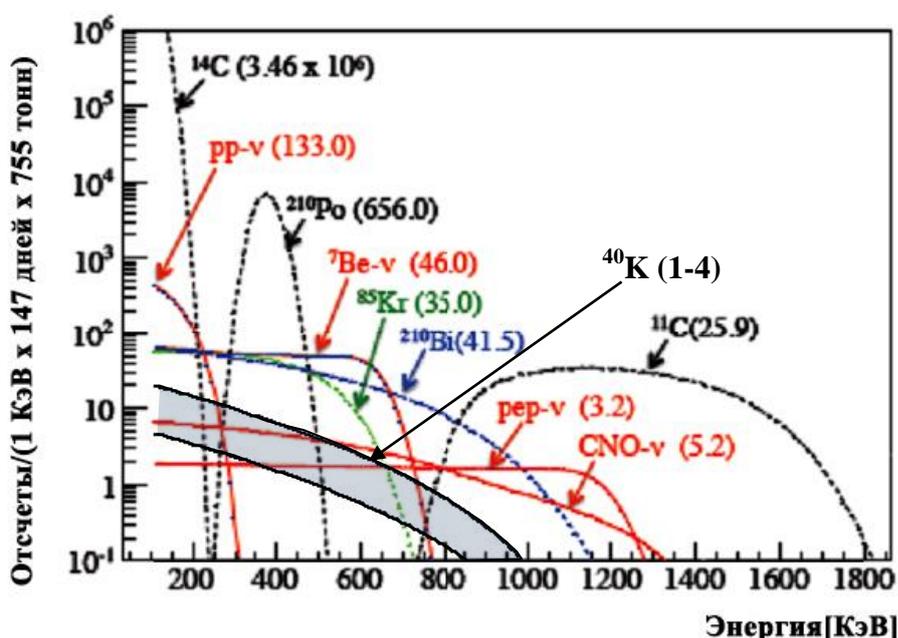


Рис. 5. Спектры одиночных событий в шкале энергосвечения в детекторе BOREXINO за 147 дней для 75.5 т жидкого сцинтиллятора. На график наложен расчетный коридор возможных спектров электронов отдачи, производимых потоком антинейтрино от  $^{40}\text{K}$ , содержащегося в Земле.

Еще одной интересной задачей, которую может решить регистрация геонейтрино – это соотношение между количествами урана и тория. В некоторых работах предполагается, что отношение содержания тория к урану может отличаться от величины 3.9, среднего содержания в коре, которое близко к отношению в хондритовых метеоритах. Планируемый аналогичный эксперимент Jingping [11] ожидает получить это отношение с точностью 10%. Предлагаемый детектор в БНО с большей массой мишени может вдвое перекрыть этот показатель.

Таблица 1. Ожидаемые скорости счета  $N_{geo}$  реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  в разных точках Земли в суммарном потоке  $\bar{\nu}_e$  от распадов U и Th (с учетом осцилляций) в единицах TNU (1 TNU= 1 событие в год в мишени, содержащей  $10^{32}$  протонов). Отношение  $R$  скорости счета фона реакторных антинейтрино  $N_{reactor}$  к скорости счета событий геонейтрино  $N_{geo}$  в диапазоне энергий геонейтрино. Приведена глубина расположения детектора.

Местоположение	Глубина м в.э.	Скорость счета $N_{geo}$ , TNU			$R = \frac{N_{reactor}}{N_{geo}}$
		[2]	[7]	наш	
Hawaii (США)	4000	13.4	12.5	23.9	0.1
Kamioka (Япония)	2700	31.6	34.8	36.8	6.7
Gran Sasso (Италия)	3700	40.5	40.5	42.4	0.9
Sudbury (Канада)	6000	47.9	49.6	49.6	1.1
Pyhäsalmu (Финляндия)	4000	49.9	52.4	51.4	0.5
Baksan (Россия)	4800	50.7	51.9	53.3	0.2
Jingping	6700	55.7*	-	56.0	0.28

\* Расчет авторов предложения [11].

## Реакторные нейтрино

Реакторные нейтрино являются неустранимым фоном при регистрации геонейтрино [12]. Поэтому важным параметром при выборе места построения детектора для регистрации геонейтрино является скорость счета событий от ядерных реакторов. БНО является одним из наиболее предпочтительных мест для такого детектора (см. табл. 1).

На рис. 6 показан характерный спектр энерговыделения в детекторе от позитронов реакции обратного бета-распада, произведенных потоком антинейтрино от ядерных реакторов с учетом осцилляций. На спектре присутствуют пики, которые определяются характерным расположением реакторов относительно детектора. Спектр от каждого реактора искажается по-разному, в зависимости от расстояния до реактора (см. Рис. 7). Анализ формы спектра позволяет извлечь параметры осцилляций электронных нейтрино.

Скорость счета от окружающих спектрометр ядерных реакторов составит около 320 событий в год для массы мишени 10 кт. Фон ядерных реакторов может меняться от года к году из-за постоянного включения и выключения реакторов, а также изменения их общего числа. Строятся и вводятся в действие новые АЭС и выводятся из эксплуатации старые реакторы.

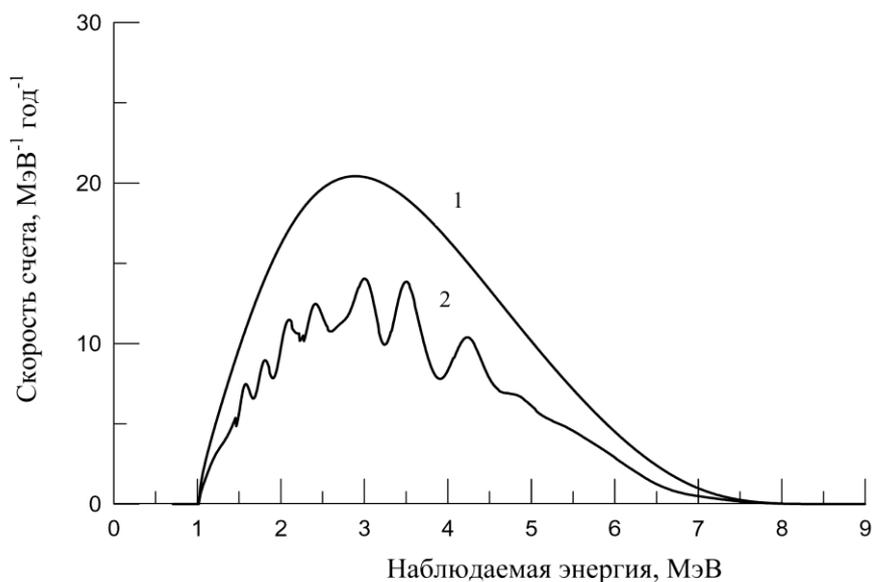


Рис. 6. Наблюдаемый в детекторе спектр антинейтрино от энергетических ядерных реакторов: 1 – спектр без учета осцилляций (~70 соб./год), 2 – спектр с учетом осцилляций (~40 соб./год). Для мишени  $10^{32}$  протонов.

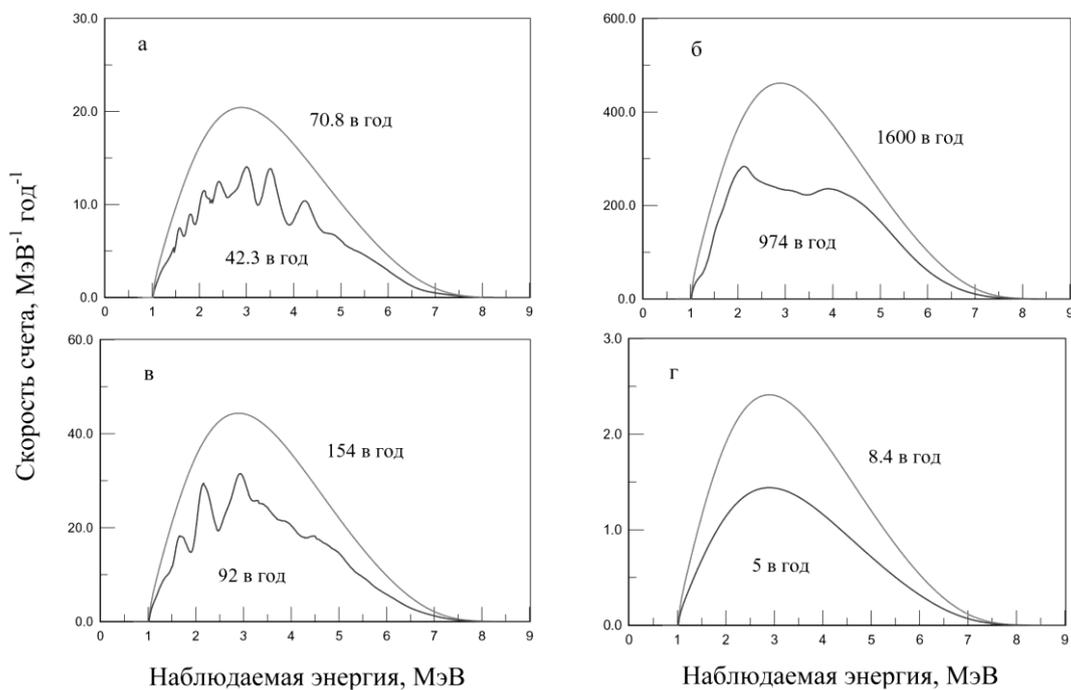


Рис. 7. Спектры антинейтрино энергетических ядерных реакторов с учетом осцилляций в местах возможного расположения детектора ( $10^{32}$  протонов): а – Баксан, б – KamLAND, в – Pyhasalmi, г – Hawaii.

## Геореактор

Предполагаемое количество радиоактивных элементов в толще Земли не дает объяснения полному тепловому потоку Земли. Также эта модель не объясняет источник энергии магнитного поля Земли и периодическую смену магнитных полюсов. Herndon [12] предложил для объяснения магнитного поля существование природного ядерного реактора в центре Земли. Чтобы описать недостающую часть тепла и необходимую интенсивность магнитного поля этот реактор (геореактор) должен обладать мощностью  $\sim 3-10$  ТВт. Эта гипотеза объясняет и периодическую смену магнитных полюсов или просто периодическое ослабление и усиление магнитного поля. Реактор периодически отравляется своими продуктами распада и останавливается, затем снова запускается, после того как продукты распада будут удалены из “активной зоны”.

Гипотеза геореактора может быть непосредственно проверена с помощью спектрометра в Баксанской нейтринной обсерватории. Скорость счета от геореактора ожидается 80–260 событий в год при эффективности регистрации 100% и с учетом осцилляций, см. рис. 8. Форма спектра не искажается осцилляциями из-за удаленности реактора ( $\sim 6000$  км), но уменьшает его интенсивность на коэффициент 0.59.

Таким образом, примерно за год измерений гипотеза геореактора мощностью 3 ТВт и более может быть подтверждена или опровергнута. На сегодняшний день мощность геореактора ограничена 4.5 ТВт, исходя из измеренийorexino и KamLAND.

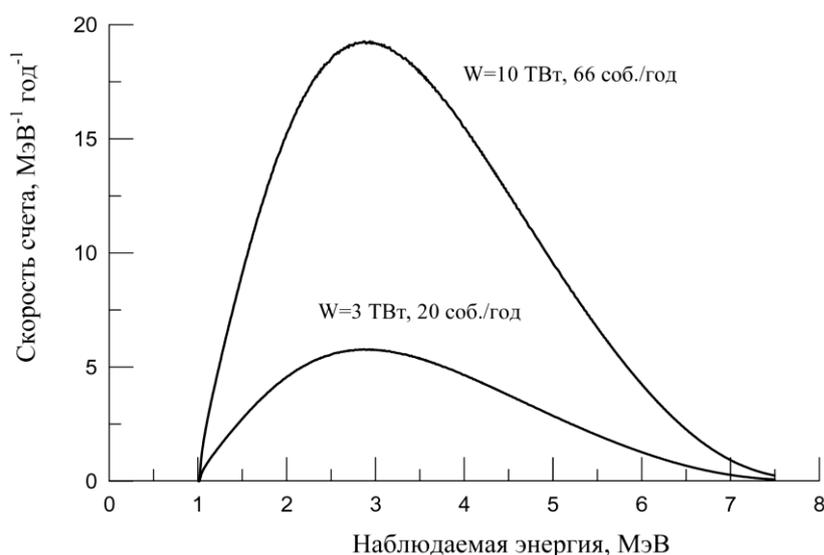


Рис. 8. Спектры антинейтрино, наблюдаемые в детекторе от геореактора. Спектры показаны с учетом осцилляций, рассчитаны для мишени  $10^{32}$  протонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жарков В. Н., Внутреннее строение Земли и планет, Москва, «Наука», 1983.
2. Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F. *et al.*, Phys.Rept. **453**, 117 (2007); arXiv: 0707.3203 [physics.geo-ph].
3. Fogli G. L., Lisi E., Palazzo A. and Rotunno A. M., Phys. Lett.B **623**, 80 (2005).
4. Mantovani F., Carmignani L., Fiorentini G. and Lissia M., Phys. Rev. D **69**, 013001 (2004); hep-ph/0309013.
5. Araki T., Enomoto S., Furuno K. *et al.*, Nature **436**, 499 (2005).
6. 14. Davies, J. H., Davies, D. R., 2010. Earth's surface heat flux. Solid Earth 1 (1), 5{24. doi:10.5194/se-1-5-2010.
7. <http://www.argo.ucsd.edu/>.
8. L. Ludhova and S. Zavatarelli, Studying the Earth with Geoneutrinos, arXiv: 1310.3996 [hep-ex].
9. Michael Wurm et al. The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA, arXiv: 1104.5620 [astro-ph.IM].
10. L. Bezrukov et al., Looking for Antineutrino Flux from  $^{40}\text{K}$  with Large Liquid Scintillator Detector, Письма в ЭЧАЯ, № [46], issue 2, p.339-345, 2015; arXiv:1405.3140 [hep-ex].
11. John F. Beacom et al. Letter of Intent: Jinping Neutrino Experiment arXiv: 1602.01733.
12. В. В. Синева Поток антинейтринного излучения от ядерных реакторов в предполагаемых местах постройки детектора для регистрации геонейтрино, препринт ИЯИ-1396/2015.
13. Herndon J. M., J. Geomagn. Geoelectr. **45**, 423 (1993); Proc. Natl. Acad. Sci. USA **100**, 3047 (2003); arXiv: 0707.4161 [physics.geo-ph].

## Солнечные нейтрино

Исследование нейтрино космического происхождения является одной из наиболее интересных и актуальных областей экспериментальной физики последних лет. Обладая уникальной проникающей способностью, они дают возможность получения количественных сведений из областей, недоступных для наблюдения при помощи других излучений. С другой стороны, проходя от источников гигантские расстояния и толщи вещества, исследование потоков космических нейтрино позволяет изучать их свойства недоступные при использовании земных источников нейтрино.

Одной из таких областей является Солнце, его внутренние слои. На Земле может проводиться исследование потоков солнечных нейтрино ( $\text{CH}$ ), идущих из недр Солнца.

С момента открытия солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса [1] был выполнен целый ряд других экспериментов по исследованию  $\text{CH}$  – Kamiokande и Super-Kamiokande (SK) (черенковские детекторы), SAGE и Gallex (радиохимические детекторы), SNO (черенковский детектор), Borexino и KamLAND (сцинтилляционные детекторы), которые подтвердили результаты первых экспериментов Дэвиса. Они решили обнаруженную в первом эксперименте проблему нехватки  $\text{CH}$ , открытием эффекта осцилляций нейтрино в веществе (так называемый, эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштайна (MSW)) [2].

В экспериментах Kamiokande, Super-Kamiokande [3] и SNO [4] с высокой точностью измерен поток борных нейтрино. В эксперименте Borexino было подтверждено значение потока борных нейтрино и дополнительно измерены потоки  $pp$ ,  $pep$ ,  ${}^7\text{Be}$  нейтрино [5]. Целью новых планируемых детекторов будет с одной стороны детальное исследование потоков  $\text{CH}$ , и с другой стороны – уточнение солнечной модели.

### 1. Потоки солнечных нейтрино

Расчетные потоки солнечных нейтрино в моделях высокой и низкой металличности (содержание других элементов, кроме водорода и гелия) без учета осцилляций [6, 7] представлены в таблице 1. Спектры нейтрино от источников в недрах Солнца показаны на рис. 9 [8].

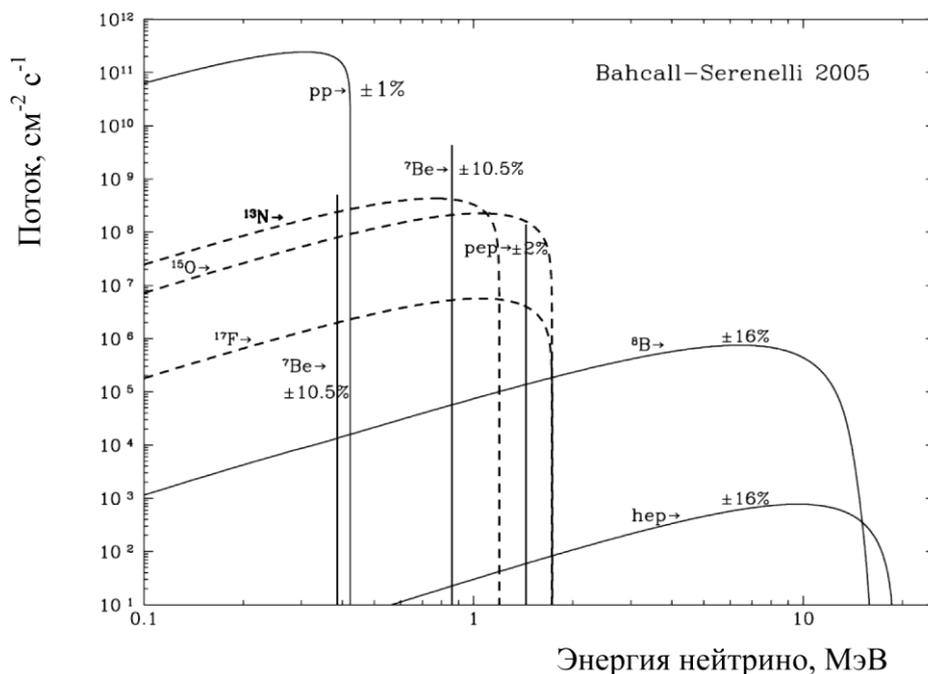


Рис. 9. Спектры нейтрино от Солнца [8]. Штриховой линией показаны спектры цикла CNO.

Таблица 1. Потоки СН в моделях высокой и низкой металличности без учета осцилляций [6, 7].

	$E_{\max}$ или $E_{\text{Line}}$ [МэВ]	Поток в модели высокой металличности [ $\times 10^{10} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ]	Поток в модели низкой металличности [ $\times 10^{10} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ]
<i>pp</i>	0.42 МэВ	5.98(1± 0.006)	6.03 (1± 0.006)
${}^7\text{Be}$	0.38 МэВ	0.053(1± 0.07)	0.048 (1± 0.07)
	0.86 МэВ	0.447(1± 0.07)	0.408 (1± 0.07)
<i>pep</i>	1.45 МэВ	0.0144(1± 0.012)	0.0147 (1± 0.012)
${}^{13}\text{N}$	1.19 МэВ	0.0296(1± 0.14)	0.0217 (1± 0.14)
${}^{15}\text{O}$	1.73 МэВ	0.0223(1± 0.15)	0.0156 (1± 0.15)
${}^{17}\text{F}$	1.74 МэВ	$5.52 \times 10^{-4}(1 \pm 0.17)$	$3.40 \times 10^{-4} (1 \pm 0.17)$
${}^8\text{B}$	15.8 МэВ	$5.58 \times 10^{-4}(1 \pm 0.14)$	$4.59 \times 10^{-4} (1 \pm 0.14)$
<i>hep</i>	18.5 МэВ	$8.04 \times 10^{-7}(1 \pm 0.30)$	$8.31 \times 10^{-7} (1 \pm 0.30)$

## 2. Регистрация солнечных нейтрино

Прохождение СН от Солнца к Земле можно разделить на 3 стадии:

- прохождение от солнечного ядра до солнечной поверхности,
- прохождение от солнечной поверхности до земной поверхности,
- прохождение от земной поверхности до детектора через слой земли в ночное время.

Детектируемым взаимодействием СН в детекторе является реакция упруго рассеяния на электронах (3). Ожидаемый спектр электронов с учетом эффекта МСВ представлен на рис. 10 и скорость взаимодействия СН от всех источников и моделей с высокой и низкой металличностью представлена для порогов 0 и 200 кэВ в таблице 2.

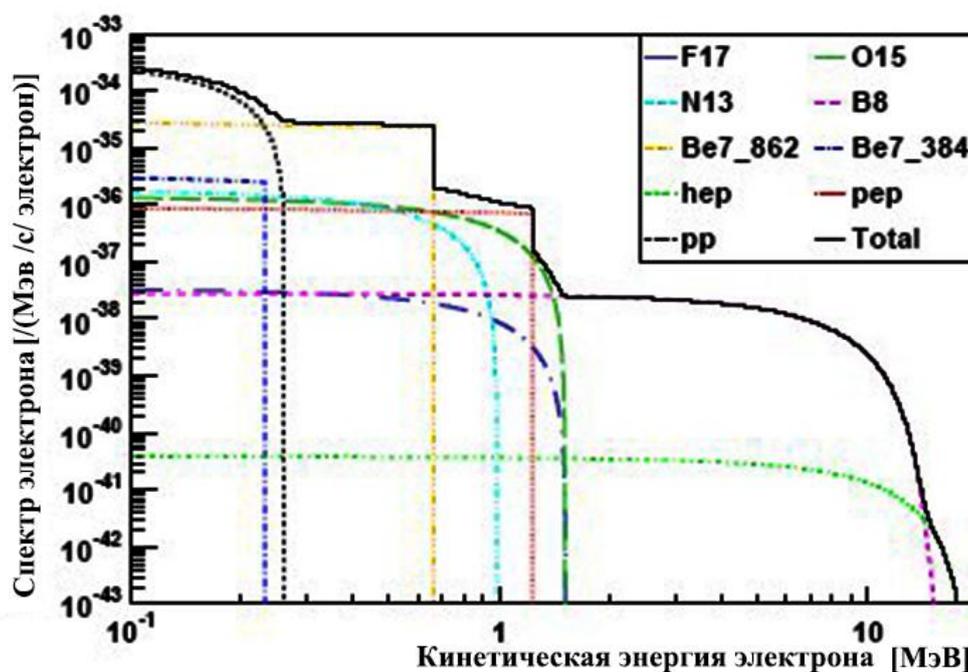


Рис. 10. Спектр электронов отдачи в сцинтиляционном детекторе для всех компонент СН с учетом МСВ эффекта и высокой металличности.

Таблица 2. Ожидаемая скорость событий для всех компонент СН для высокой и низкой металличности.

Скорость электронных событий [/день/1кТ]	> 0 кэВ в модели высокой металличности	> 0 кэВ в модели низкой металличности	> 220 кэВ в модели высокой металличности	> 200 кэВ в модели низкой металличности
<i>pp</i>	1325.9 ± 8	1337 ± 8	45.57 ± 0.27	45.95 ± 0.28
<sup>7</sup> Be (0.38 МэВ)	19.3 ± 1.3	17.6 ± 1.2	2.28 ± 0.16	2.08 ± 0.15
<sup>7</sup> Be (0.86 МэВ)	469 ± 33	428 ± 30	316 ± 22	288 ± 20
<i>pep</i>	27.35 ± 0.33	27.92 ± 0.34	22.44 ± 0.27	22.91 ± 0.28
<sup>13</sup> N	24.5 ± 3.4	18 ± 2.5	14.8 ± 2.1	10.9 ± 1.5
<sup>15</sup> O	27.8 ± 4.2	19.5 ± 0.29	20.3 ± 3.1	14.2 ± 2.1
<sup>17</sup> F	0.69 ± 0.12	0.426 ± 0.072	0.506 ± 0.086	0.312 ± 0.053
<sup>8</sup> B	4.43 ± 0.62	3.64 ± 0.51	4.27 ± 0.6	3.51 ± 0.49
<i>hep</i>	0.009 ± 0.003	0.009 ± 0.003	0.009 ± 0.003	0.009 ± 0.003

Более точное измерение потоков СН позволит не только уточнить параметры солнечной модели, но и позволит исследовать возможные временные флуктуации возникновения солнечной энергии.

*pp* нейтрино. Эффективность регистрации *pp* нейтрино, как видно из таблицы 2, очень сильно зависит от порога регистрации. Проблема состоит в том, что в составе сцинтиллятора присутствует изотоп <sup>14</sup>C с максимальной энергией бета распада 156 кэВ. С учетом энергетического разрешения это определяет порог 200 кэВ. Мы начали программу по поиску сцинтилляторов с минимальным содержанием <sup>14</sup>C, используя сцинтилляционные детекторы разного объема. Расчеты показывают, что если образование <sup>14</sup>C в исходной нефти связано с реакциями под действие естественных радиоактивных элементов, то могут существовать нефти с содержанием <sup>14</sup>C на 3 порядка меньшими, по сравнению со сцинтилляторами KamLAND и Borexino [9].

CNO Нейтрино. CNO цикл является основным источником энергии для звезд с более высокой температурой, чем у Солнца. В Солнце основным производителем энергии является *pp*-цикл, однако, регистрация CNO нейтрино от Солнца важна с точки зрения уточнения моделей звезд и Солнца.

В эксперименте Борексино установлен верхний предел на поток CNO нейтрино, превышающий ожидаемое значение по стандартной модели в 2 раза. Основная проблема состоит в образовании в сцинтилляторе детектора изотопа <sup>11</sup>C при прохождении через него мюонов. В планируемом эксперименте на БНО интенсивность потока мюонов в 10 раз ниже по сравнению с Гран Сассо и в совокупности с большей

статистикой детектор с массой в несколько кт позволит измерить поток CNO нейтрино ( $^{15}\text{O}$ ) с точностью не хуже 30% в предположении фоновых условий Bogerino.

Нер нейтрино. Нер нейтрино ( $^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$  ( $E_\nu < 18.8$  МэВ)) обладают наивысшей энергией среди все источников СН. Поиск Нер нейтрино важен с точки зрения солнечной модели, насколько точно он предсказывается. Обнаружить этот спектр возможно по изучению формы спектра борных нейтрино в области верхней границы.

#### Проблема металличности.

Современные наблюдения солнечной фотосферы показывают меньшее содержание металлов по сравнению с более ранними наблюдениями. Новые солнечные модели с более низким содержанием металлов предсказывают несколько иное соотношения потоков СН по сравнению со Стандартной солнечной моделью (таблица 2). Решающее значение здесь будет играть наблюдение CNO нейтрино.

#### **Эффект МСВ для солнечных нейтрино.**

Современная ситуация с экспериментальной проверкой эффекта МСВ представлена на рис. 11 [5]. Из рисунка видно, что в пределах неопределенностей существует согласие экспериментов с предсказанием эффекта МСВ. Но неопределенности остаются значительными и необходимы более точные данные, особенно в переходной области от вакуумных осцилляций к осцилляциям в веществе для окончательных выводов. Эта область является критической для проверки эффекта МСВ.

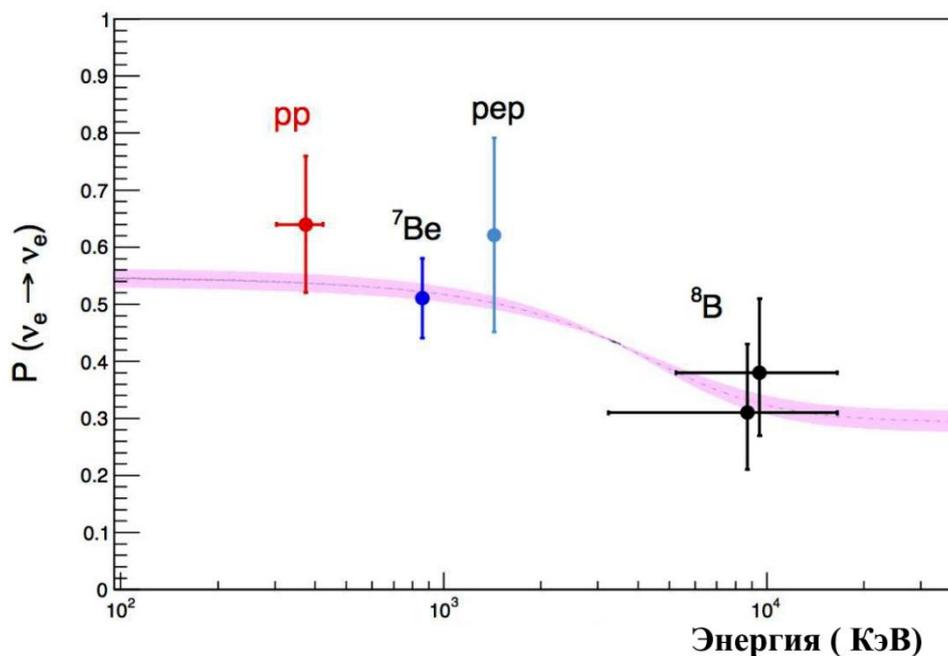


Рис. 11. Вероятность осцилляций (эффект МСВ) в зависимости от энергии для солнечных нейтрино и экспериментальные данные [5].

Повышение на порядок статистики для  ${}^7\text{Be}$  и *per* нейтрино и наблюдение CNO нейтрино позволит уменьшить современные неопределенности как минимум в несколько раз при фоновых условияхorexino.

#### **Уточнение параметров $\theta_{12}$ и $\Delta m^2_{21}$ .**

В настоящее время существует расхождение в пределах  $2\sigma$  между значением  $\Delta m^2_{21}$ , получаемым из солнечных и реакторных данных. Солнце испускает электронные нейтрино, в то время как реактор – электронные антинейтрино. И те и другие могут помочь уточнить параметры матрицы Понтекорво-Маки-Накагавы-Саката (ПМНС) и предоставить тест для проверки CP инвариантности. Точное измерение  $\theta_{12}$  позволит уточнить нижнюю границу массы нейтрино в двойном безнейтринном бета распаде в случае обратной иерархии нейтринных масс.

#### **Асимметрия день/ночь.**

При прохождении СН через землю электронные нейтрино могут быть регенерированы посредством эффекта МСВ, что приводит к тому, что нейтринный поток борных нейтрино в ночное время будет слегка выше, чем в дневное. Указание на существование подобной асимметрии с достоверностью  $2\sigma$  ( $\sigma = 2.7\%$ ) получено в эксперименте SK [3]. Этот эффект очень чувствителен к точному значению  $\Delta m^2_{21}$ , профилю плотности и увеличивается с возрастанием энергии. Асимметрия нейтринного потока день/ночь определяется, как:

$$S=2(N-D)/(N+D), \quad (5)$$

где N и D - число событий в ночное и дневное время. Согласно сделанным оценкам значение S находится в пределах 1-3% [10, 11].

Неопределенность  $\sigma_S = 2/N_B^{1/2}$ , где  $N_B$  - полное число зарегистрированных борных нейтрино.

Скорость счета борных нейтрино с энергией  $E > 3$  МэВ составляет приблизительно 100 событий/год/т в водяной мишени. За 5 лет измерений детектором с массой мишени 10 кт может быть достигнута точность  $\sigma_S \approx 0,6\%$ , что может быть доступно измерению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. B.T. Cleveland *et al.*, *Astrophys. J.* 496, 505 (1998).
2. S.P. Mikheev and A.Y. Smirnov, *Sov. J. Nucl. Phys.* 42, 913 (1985); *Nuovo Cimento* 9C, 17 (1986); L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D* 17, 2369 (1978).
3. Y. Fukuda *et al.*, Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super Kamiokande's First 300 Days, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 1158-1162.
4. Q.R. Ahmad, R.C. Allen, T.C. Andersen *et al.* Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory// *Phys. Rev. Lett.*, v.89, N1, p.011301-1–011301-6, 2002. // arXiv:nucl-ex/0204008.
5. O.Yu.Smirnov *et al.*, Measurement of neutrino flux from the primary proton–proton fusion process in the Sun with Borexino detector, arXiv:1507.02432v1 [hep-ex].
6. A. Serenelli, W. C. Haxton, and C. Peña-Garay, *Astrophys. J.* 743, 24 (2011).
7. A. Serenelli, S. Basu, J.W. Ferguson, and M. Asplund, *Astrophys. J.* 705, L123 (2009).
8. J. Bahcall, A. Serenelli, and S. Basu, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 165, 400 (2006).
9. I. Barabanov, L. Bezrukov, E. Resconi, S. Schonert, The  $^{14}\text{C}$  abundance in liquid organic scintillators and oil. Препринт ИЯИ-1316/2012.
10. A. Renshaw, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* 112, 091805 (2014).
11. J. N. Bahcall, P. I. Krastev, and A. Yu. Smirnov, *Phys. Rev. D* 60, 093001 (1999).

## Нейтрино от вспышки сверхновой

Одновременно с гравитационным коллапсом железного ядра массивной звезды ( $M \geq 8M_{\odot}$ ) начинается вспышка “тепловых” нейтрино и длится около 20 с. В раскаленном ядре рождаются все шесть типов активных нейтрино:  $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_{\mu}, \bar{\nu}_{\mu}, \nu_{\tau}$  и  $\bar{\nu}_{\tau}$ . Эти нейтрино уносят подавляющую часть гравитационной энергии  $\sim 3 \times 10^{53}$  эрг, выделившейся при коллапсе. Только через десятки минут или несколько часов взрыв достигает поверхности, и на небе вспыхивает Сверхновая, наблюдаемая невооруженным глазом и методами оптической, рентгеновской, радио- и гамма-астрономии. По окончании взрыва большая часть вещества звезды рассеивается в пространстве, а на месте ядра остается нейтронная звезда (или “черная дыра”).

К началу нейтринной вспышки из-за высокой плотности внутренняя часть ядра становится непрозрачной для нейтрино. Перед вылетом нейтрино многократно рассеиваются, поглощаются и испускаются вновь. Поверхность, с которой нейтрино могут покинуть ядро, называют нейтриносферой. Из-за различия в сечениях взаимодействия радиусы нейтриносфер для разных типов нейтрино отличаются друг от друга. Глубже всех располагается нейтриносфера  $\nu_{\mu}, \bar{\nu}_{\mu}, \nu_{\tau}$  и  $\bar{\nu}_{\tau}$  (радиус  $\sim 30$  км), далее следует нейтриносфера  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 50$  км), за ней – нейтриносфера  $\nu_e$  ( $\sim 70$  км). Этим объясняется предсказываемое различие в средних энергиях нейтрино, покидающих ядро ( $\sim 10$  и  $\sim 12.5$  МэВ для электронных нейтрино и антинейтрино и  $\sim 25$  для мюонных и таонных). Чем больше радиус, тем меньше средняя энергия. Однако, как показывают расчеты, все типы нейтрино делят уносимую ими энергию коллапса примерно поровну.

Непосредственно перед “тепловым” излучается короткий импульс ( $\sim 10^{-2}$  с) электронных нейтрино  $\nu_e$ , возникающих при нейтронизации ядра, достигшего предела устойчивости (предел Чандрасекара). Эти  $\nu_e$ , имеющие энергии 15–20 МэВ, уносят 5–10% выделившейся при коллапсе энергии.

Изучение нейтринной вспышки в лаборатории – это мощный инструмент исследования энергетики и динамики коллапсирующей звезды, а также свойств самих нейтрино.

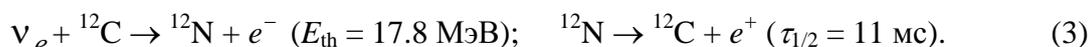
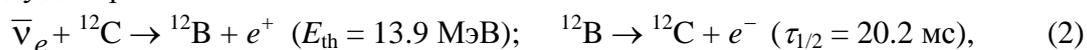
На существование нейтринной вспышки, сопровождающей коллапс, впервые было указано в 1965 г. [1]. В последующие годы велись интенсивные расчеты динамики взрыва Сверхновых и испускания нейтрино [2–5]. Имеется ряд подробных обзоров (см. работы [6, 7] и приведенную в них литературу). Способ регистрации нейтринной вспышки был также предложен в 1965 г. [8]: в достаточно массивном низкофоновом детекторе нейтрино должна наблюдаться статистически значимая серия сигналов. Однако вспышка Сверхновых – весьма редкое событие (в нашей Галактике ожидается одна вспышка за  $\sim 30$  лет). Поэтому авторы [8] предложили синхронизировать работу различных детекторов для увеличения надежности и информативности. В настоящее время функционирует международная система SNEWS [9, 10] (SuperNova Early Warning System), объединяющая все детекторы, способные зарегистрировать

нейтрино от Сверхновой. Одно из назначений этой системы – послать предупреждение астрономам об ожидаемой вспышке Сверхновой.

Нейтрино, рождаемые в результате коллапса, играют важную роль в нуклеосинтезе [11–13]. Наблюдаемую распространенность ряда легких элементов ( ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{19}\text{F}$  и др.), а также распространенность так называемых обойденных элементов тяжелее железа удается объяснить с помощью нейтринных реакций в радиусе 1000 км от центра ядра звезды.

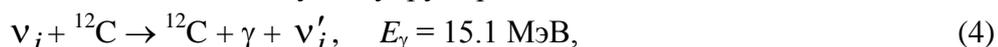
Можно отметить, что регистрация вспышки нейтрино от Сверхновой – это осцилляционный эксперимент с базой  $\sim 30$  тыс. световых лет и что рожденные в звезде нейтрино проходят области, в которых плотность в  $\sim 10^9$  раз превосходит плотность вещества в центре Солнца. Флейворный состав нейтрино, падающих на детектор, зависит от величины параметра смешивания  $\sin^2\theta_{13}$  и от типа иерархии масс (прямая или обращенная) [14, 15]. Превращения  $\bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau \rightarrow \bar{\nu}_e$  открывают возможность изучения интенсивностей и энергий  $\bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ , прямое выделение сигнала которых современными методами практически невозможно.

Нейтрино и антинейтрино от Сверхновой в детекторе будут производить несколько эффектов. Наибольшее число событий за вспышку ( $\approx 1200$  см. табл. 2) ожидается от реакции (1). Вместе с тем, использование в качестве мишени ядер углерода  ${}^{12}\text{C}$  позволит разделить  $\nu_e$  от  $\bar{\nu}_e$  по характерным продуктам реакций и распаду дочерних изотопов  ${}^{12}\text{B}$  и  ${}^{12}\text{N}$ :



Из-за высоких порогов реакций (2, 3) число событий при отсутствии осцилляций крайне мало.

Нейтрино всех видов  $\nu_i$  могут не упруго рассеиваться на  ${}^{12}\text{C}$



в результате чего возникает монохроматическая линия одиночных квантов, регистрируемых детектором. Из-за низких энергий  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  их суммарный вклад в полный эффект реакции (4) не превысит 5%, и доминирующую роль здесь будут играть жесткие  $\nu_x (= \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$  нейтрино. Сечения реакций (2–4) взяты из работы [16].

Все виды нейтрино участвуют в реакции упругого  $\nu_i e^-$  - рассеяния



регистрация электронов отдачи которой дает принципиальную возможность определения направления на Сверхновую.

Наблюдаемый в детекторе спектр позитронов будет зависеть от характера нейтринных осцилляций. Возможные варианты спектров показаны на рис. 12.

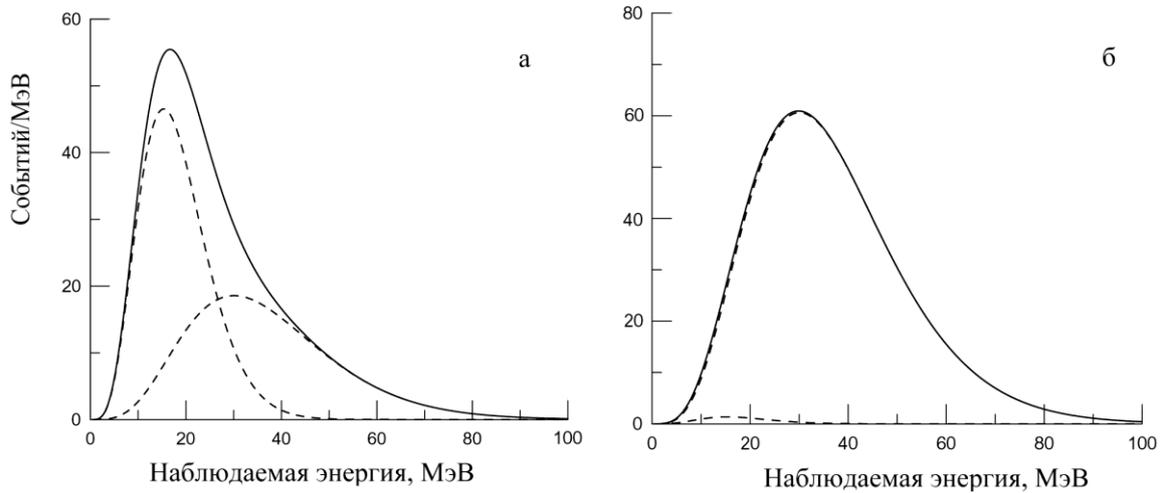


Рис. 12. Спектры позитронов реакции обратного бета-распада в детекторе от антинейтрино от сверхновой с учетом осцилляций: а – нормальная иерархия масс. Штриховой линией показаны образующие спектры электронных антинейтрино и мюонных и тау (более жесткие), б – обратная иерархия масс при условии  $\sin^2 \theta_{13} > 10^{-3}$ .

**Таблица 2.** Ожидаемое число нейтринных событий в сцинтилляционном детекторе с массой мишени 5 кт ( $4 \times 10^{32}$  протонов,  $16 \times 10^{32}$  электронов,  $2 \times 10^{32}$  ядер  $^{12}\text{C}$ ) от вспышки “тепловых” нейтрино при коллапсе ядра Сверхновой (расстояние до Сверхновой 10 килопарсек, уносимая при коллапсе энергия нейтрино составляет  $\sim 3 \times 10^{53}$  эрг, прямая иерархия масс)

Реакция	Без осцилляций	LMA MSW ( $\sin^2 \theta_{13} > 10^{-3}$ )	LMA MSW ( $\sin^2 \theta_{13} < 10^{-5}$ )
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	1157	1479	1479
$\bar{\nu}_e + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B} + e^+$	14.4	35.5	35.5
$\nu_e + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N} + e^-$	5.8	132	93.5
$\Sigma ^{12}\text{C}(\nu_i, \nu_i')^{12}\text{C} + \gamma^*$	236	236	236
$\Sigma (\nu_i, e^-) \rightarrow (\nu_i, e^-)$	70.6	62.2	61.4

\*  $\nu_i = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Гусейнов О. Х., ДАН СССР **162**, 791 (1965).
2. Arnett W. D., Can. J. Phys. **44**, 2553 (1966).
3. Надежин Д. К., Отрощенко Н. В., Астрон. журн. **57**, 78 (1980).
4. Bowers R. and Wilson J. R., Astrophys. J. **263**, 366, (1982).
5. Totani T. *et al.*, Astrophys. J. **496**, 216 (1998).
6. Cei F., Int. J.Mod. Phys. A **17**, 1765 (2002).
7. Bethe H. A., Rev.Mod. Phys. **62**, 801 (1990).
8. Domogatsky G. and Zatsetpin G., in *Proceedings of the 9th ICRC, London, 1965*, Vol. 2, p. 1030.
9. Antonioli P. *et al.*, New J. Phys. **6**, 114 (2004); astro-ph/0406214.
10. Scholberg K., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **91**, 331 (2001).
11. Domogatsky G. V. and Nadyozhin D. K., Mon. Not. R. Astron. Soc. **178**, 33 (1977).
12. Domogatsky G. V., Eramzhyan R. A. and Nadyozhin D. K., Astrophys. Space Sci. **58**, 273 (1978).
13. Woosley S. E. *et al.*, Astrophys. J. **356**, 272 (1990).
14. Dighe A. S. and Smirnov A. Yu., Phys. Rev. D **62**, 033007 (2000); hep-ph/9907423.
15. Aglietta M. *et al.*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **110**, 410 (2002); astro-ph/0112312.
16. Fukugita M., Kohyama Y. and Kubodera K., Phys. Lett. B **212**, 139 (1988).

## Диффузный нейтринный фон

Хотя все виды  $\nu_i$  и  $\bar{\nu}_i$  флейворов присутствуют в потоке реликтовых нейтрино, которые были сгенерированы при коллапсах ядер массивных звезд, основная надежда на регистрацию SRN (Supernovae Relic Neutrinos) связана с электронными антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ . Ожидаемый полный поток  $\bar{\nu}_e$  SRN очень мал и по разным оценкам составляет около  $12\text{--}16 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [1]. Вместе с тем, большой интерес к регистрации SRN связан с получением нового и непрерывного, в отличие от вспышек Сверхновых, источника информации о механизме коллапса массивных звезд и свойствах нейтрино (массы, смешивание и магнитный момент), а также частоте коллапсов и скорости формирования звезд во Вселенной [1–5]. Вероятность обнаружения SRN усиливается тем фактом, что наилучшее ограничение  $\sim 1.4\text{--}1.9 \bar{\nu}_e \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для  $E_{\bar{\nu}_e} > 19.3 \text{ МэВ}$  (90% C.L.), полученное с помощью детектора Super-Kamiokande [6], всего лишь в несколько раз превышает оценки потока  $\bar{\nu}_e$  SRN для этой области энергий. Ожидаемая скорость счета  $\bar{\nu}_e$  SRN для проекта LENA [7] (объем мишени  $2.9 \times 10^{33}$  атомов водорода [4]) при размещении его в Центре подземной физики в Рухасальми (Финляндия) по наиболее часто встречающимся в печати оценкам составит  $\sim 4\text{--}6$  событий год в диапазоне энергий  $E_{\bar{\nu}_e} = 9.7\text{--}25 \text{ МэВ}$ , см. [4, 5, 7]. Диапазон измерений ограничен фоном реакторных антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  в мягкой области спектра SRN и атмосферных  $\bar{\nu}_e$  в её жесткой части.

На рис. 6 показаны ожидаемые спектры событий реакции (1) в детекторе для всех  $\bar{\nu}_e$ , в том числе и SRN (кривая 5). Для сравнения условий регистрации  $\bar{\nu}_e$  SRN на Баксане и в Рухасальми распределение скорости счета  $\bar{\nu}_e$  SRN в детекторе представлено при тех же предположениях (прямая иерархия масс нейтрино, спектр  $\bar{\nu}_e$  SRN из работы [1] с параметром нормализации  $f_{\text{SN}} = 1$  для LL модели Сверхновой), что и для детектора LENA, см. [4]. Скорость счета реакторных антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  для детектора рассчитана по данным прямых измерений спектра  $\bar{\nu}_e$  на реакторе [8]. Потоки реакторных (см. табл. 1) и атмосферных  $\bar{\nu}_e$  (см. [4]) на Баксане почти вдвое меньше, чем в Рухасальми. Это приводит к расширению энергетического диапазона измерений реликтовых  $\bar{\nu}_e$  на Баксане, см. рис. 13. В диапазоне  $E_{\bar{\nu}_e} = 8.0\text{--}30 \text{ МэВ}$  ожидаемая скорость счета  $\bar{\nu}_e$  SRN в детекторе составит около 1 события за год измерений.

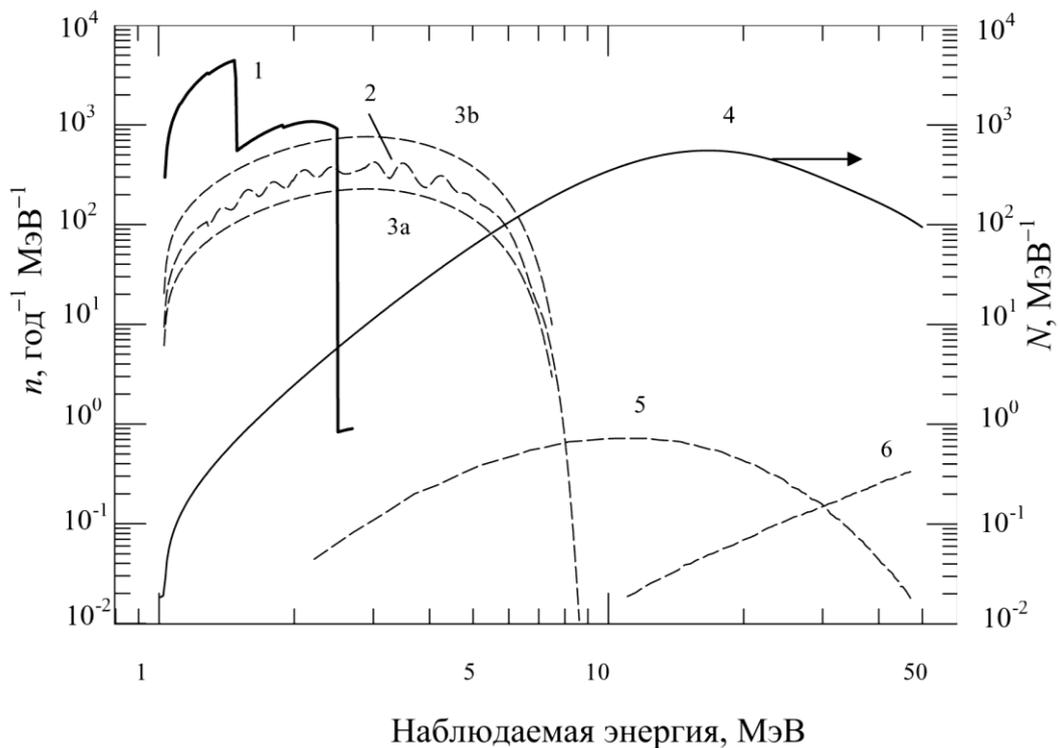


Рис. 13. Спектры позитронов реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  в детекторе на Баксане (мишень – органический сцинтиллятор 5 кт, осцилляции учтены): 1 – от геонейтрино, 2 – от  $\bar{\nu}_e$  окружающих детектор реакторов, 3a, 3b – от  $\bar{\nu}_e$  гипотетического геореактора, 4 – от  $\bar{\nu}_e$  при вспышке Сверхновой, см. текст (правая шкала), 5 – от реликтовых  $\bar{\nu}_e$  от Сверхновых, 6 – от атмосферных  $\bar{\nu}_e$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ando S., *Astrophys. J.* **607**, 20 (2004); astro-ph/0401531.
2. Домогацкий Г. В., Диссертация д-ра физ.-мат. наук, ИЯИ АН СССР (Москва, 1980); *Астрон. журн.* **61**(1), 51 (1984).
3. Ando S. and Sato K., *New J. Phys.* **6**, 170 (2004); astro-ph/0410061.
4. Wurm M., Feilitzsch F. von, Göger-Neff M. *et al.*, *Phys.Rev.* **D75**, 023007 (2007); astro-ph/0701305.
5. Volpe C. and Welzel J., astro-ph/0711.3237.
6. Lunardini C. and Peres O., astro-ph/0805.4225.
7. Oberauer L., *Mod.Phys.Lett.* **A19**, 337 (2004); hep-ph/0402162.
8. Копейкин В. И., Микаэлян Л. А., Синев В. В., *ЯФ* **60**, 230 (1997).

## Конструкция детектора нейтрино

Баксанский детектор антинейтрино предположительно будет состоять из трех concentрических сферических зон. Центральная зона диаметром около 22.5 м, заполнена жидким органическим сцинтиллятором и служит мишенью для антинейтрино. Вторая concentрическая зона имеет толщину 2 м и заполнена несцинтиллирующей органической жидкостью для подавления фона от фотоумножителей. Зона отделена от мишени прочной прозрачной пленкой (типа нейлон) или корпусом из оргстекла. Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или другие фотоприемники для просмотра мишени устанавливаются на поверхности второй зоны. Внешняя зона детектора – зона антисовпадений. Она отделена от второй зоны непрозрачной металлической конструкцией, заполнена водой (или минеральным маслом) и просматривается ФЭУ, регистрирующими черенковское излучение космических мюонов и ливней. Внешние размеры детектора должны будут составлять около 33 м.

Рассматривается возможность применения в качестве фотоприемников как обычных вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), так и матриц из кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ). Матрицы из КФЭУ, при использовании их с соответствующим коллектором оптического излучения, также дают возможность получать снимки светящихся треков заряженных частиц в сцинтилляторе. Такой метод съема информации позволяет получить изображение события внутри объема сцинтиллятора, анализ которого даёт принципиальную возможность разделять различные классы событий.

В качестве возможных вариантов мишени жидкого органического сцинтиллятора рассматриваются композиции, приготовленные на основе чистого ЛАБа (линейный алкил-бензол). Аналогичный растворитель предполагает использовать коллаборация SNO+) или его смеси с другими жидкими растворителями, типа РС, РХЕ и др. Сцинтиллятор должен иметь высокую сцинтилляционную эффективность и быть прозрачным, чтобы обеспечить хорошее энергетическое разрешение. Выбор активатора (РРО, ВРО и др.) и его концентрация будет также связана с достижением наилучшего временного и, как следствие, пространственного разрешения. При создании такого крупномасштабного сцинтилляционного детектора важное значение приобретают вопросы, связанные со стоимостью и техникой безопасности применяемого сцинтиллятора. В этом отношении сцинтиллятор на основе ЛАБа имеет определённые преимущества. ЛАБ производится в больших количествах и имеет низкую стоимость. Кроме того, его температура вспышки составляет ~ 130°C.

В детекторе будут регистрироваться коррелированные во времени и пространстве световые сигналы от позитрона и от  $\gamma$ -кванта захвата нейтрона реакции (1) водородом сцинтиллятора или специально добавленным в сцинтиллятор поглотителем нейтронов типа Gd. Среднее время жизни нейтрона до захвата составляет ~200 мкс при отсутствии Gd или 30-50 мкс при добавлении ~1-0.5 г/л Gd. Мы принимаем, что полезный объем мишени содержит  $4 \times 10^{32}$  атомов водорода,  $2 \times 10^{32}$  атомов  $^{12}\text{C}$  и  $16 \times 10^{32}$  электронов.

По своей структуре детектор должен быть близок к установке KamLAND, отличаясь от нее большей массой мишени и более глубоким расположением под землей. Схема детектора показана на рис. 14.

На стадии подготовки создания детектора будут проводиться исследования конструкции детектора, совместимости материалов детектора с жидким сцинтиллятором, а также методика проведения долговременных измерений на макете детектора, который предполагается установить в специальном помещении ближе к выходу из тоннеля. На рис. 15 показана схема макета детектора для установки в БНО.

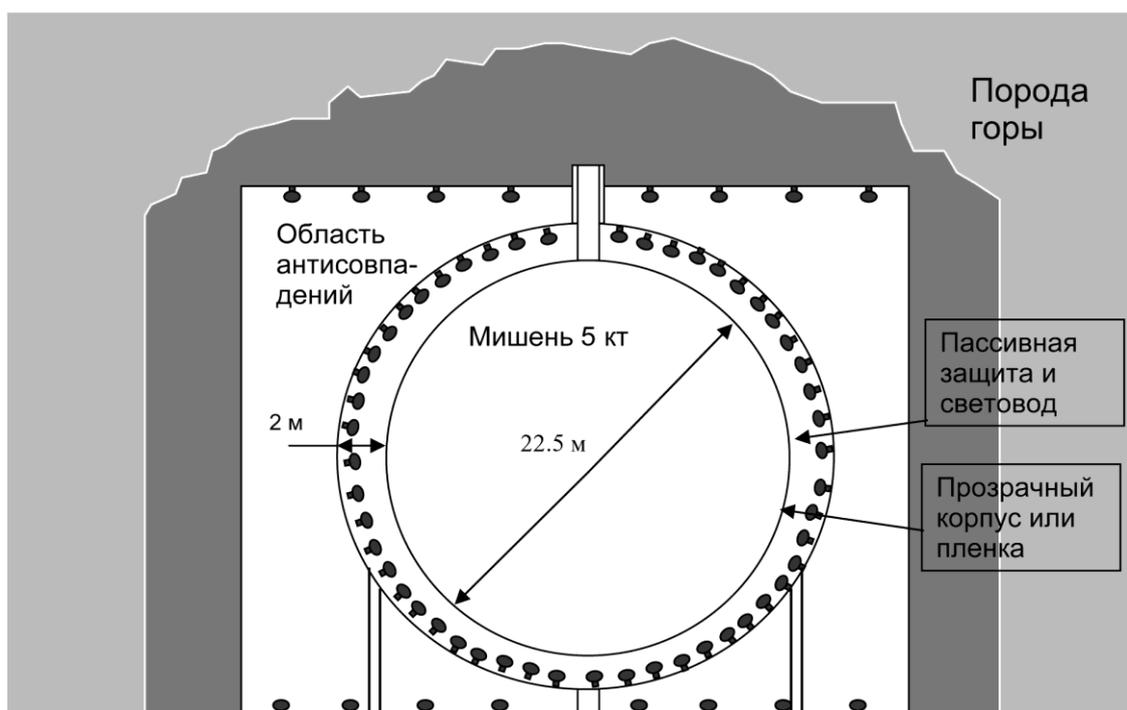


Рис. 14. Схема детектора нейтрино, предлагаемого для установки в Баксанской нейтринной обсерватории.

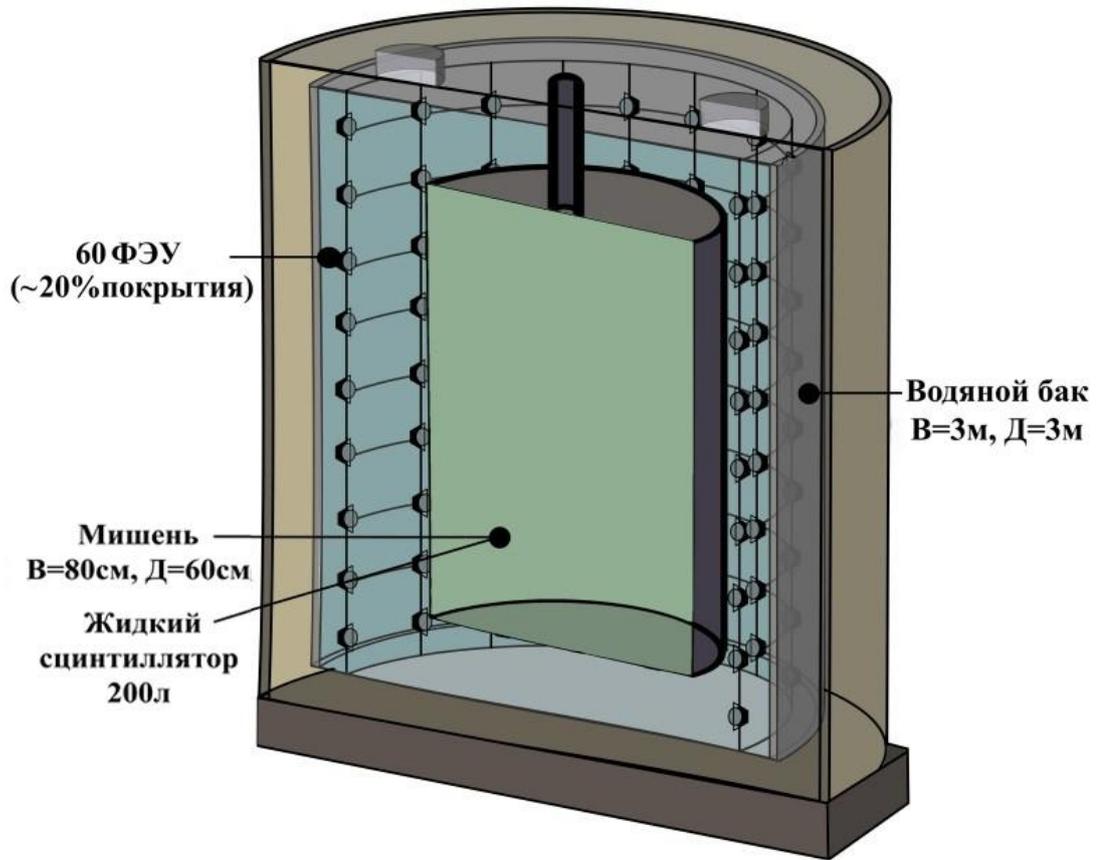


Рис. 15. Конструкция модуля детектора нейтрино, предлагаемого для установки в Баксанской нейтринной обсерватории.

## Жидкий сцинтиллятор для мишени

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  $^{14}\text{C}$ , предел на уровне  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} < 10^{-21}$  [1]. Наблюдаемое расхождение измеренных концентраций изотопа  $^{14}\text{C}$  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 [2], где отмечается высокое требование к радиоактивной чистоте метана для использования в ТРС (Time Projection Chamber), рассматриваются различные факторы и механизмы, влияющие на колебания концентраций  $^{14}\text{C}$  в нефтяных и газовых подземных источниках. В работе [3] была измерена концентрация  $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$  в различных образцах жидкого органического сцинтиллятора, позволяет провести анализ широкого круга факторов, определяющих его содержание, и в перспективе создать сцинтиллятор с пониженным содержанием  $^{14}\text{C}$ .

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

ЛАБ представляет собой смесь углеводородов с общей формулой  $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ , плотностью 0.856 г/л и температурой вспышки  $143^\circ\text{C}$  [5, 6]. 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 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.

Для жидкого сцинтиллятора на основе ЛАБа были проведены измерения световыхода и прозрачности (ослабление потока в  $e$  раз), которые дали значения  $\sim 8000$  фотонов/МэВ и 15 м при длине волны света 420 нм. Полученные значения позволяют проводить измерения в низкоэнергетической ( $< 50$  кэВ) области спектра от распада радиоуглерода.

Содержание ядер водорода H, углерода C и электронов в 1000 т ЛАБ и псевдокумола приведено в таблице 3.

Для исследования был использован образец сцинтиллятора объемом 1360 мл, который полностью помещался в ячейку объемом 1.5 л. Сверху оставлялся небольшой объем, который заполнялся азотом по мере продувания сцинтиллятора азотом.

Таблица 3. Содержание ядер водорода углерода и электронов в 1000 т линейного алкилбензола (ЛАБ) и псевдокумола (РС).

1000 т	ЛАБ	РС
Формула	$C_{17,73}H_{29,46}$	$C_9H_{12}$
Н	$7.33 \times 10^{31}$	$6.01 \times 10^{31}$
С	$4.41 \times 10^{31}$	$4.51 \times 10^{31}$
Электроны	$3.44 \times 10^{32}$	$3.31 \times 10^{32}$

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 <sub>420nm</sub> 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)	$2 \times 10^{-6}$	
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)	$1 \times 10^{-17}$	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 (NA).

Для демонстрации применения возможных методов очистки сцинтиллятора от радиоактивных примесей была использована методика с внесением в качестве метки в сцинтиллятор радиоактивных изотопов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  [7].

Чтобы удалить уран и торий из ЛАБа были испробованы следующие методы:

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

Для удаления калия из ЛАБа использовались:

1. Резекстракция 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 (аминометилендифосфоновая 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%.

Проведённые лабораторные испытания образцов сцинтиллятора на основе ЛАБа показали совместимость с конструкционными материалами оптических ячеек выполненных из орг. стекла типа Plexiglas GS. Стабильность и совместимость сцинтиллятора на основе ЛАБа с орг. стеклом продемонстрирована в таких крупных экспериментах, как Daya Bay и RENO. Также планируется использовать орг. стекло в качестве конструкционной оболочки сцинтилляционного детектора в новых планируемых экспериментах SNO+ (1000 т.) и JUNO (20 кт).

## ЛИТЕРАТУРА

1. I. Barabanov, L. Bezrukov, E. Resconi, S. Schonert, The  $^{14}\text{C}$  abundance in liquid organic scintillators and oil. Препринт ИЯИ-1316/2012.
2. G. Bonvicini, N. Harris and V. Paolone, The chemical history of  $^{14}\text{C}$  in deep oil fields. arXiv:hep-ex/0308025, 2003.
3. C. Buck *et al.*, ПТЭ, № 1, с. 40, 2012; Instruments and Experimental Techniques, 55, 34, 2012.
4. И. Р. Барабанов, Г. Я. Новикова, В. В. Синева, Е. А. Янович, Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН 1228/2009. I. R. Barabanov, G. Ya. Novikova, V. V. Sineva and E. A. Yanovich, Research of the natural neutrino fluxes by use of large volume scintillation detector at Baksan. arXiv: 0908.1466 [hep-ph].
5. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Н. А. Данилов 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.
6. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова и А. С. Чепурнов, Исследование прозрачности отечественного ЛАБа как растворителя сцинтилляторов большого объема. Препринт ИЯИ-1382/2014.
7. 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная стратегия развития нейтринной гео- и астрофизики состоит в создании сети подземных обсерваторий с крупными многоцелевыми экспериментальными установками. В настоящей работе рассмотрена программа изучения природных потоков нейтрино и свойств нейтрино в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с помощью спектрометра с массой мишени жидкого органического сцинтиллятора около 10 кт. Хорошая ожидаемая статистическая обеспеченность опытов в сочетании с низким фоном позволит сделать следующий шаг в развитии физики нейтрино низких энергий.

### **Large volume detector at Baksan Neutrino Observatory for Researches of natural neutrino fluxes for geo and astrophysics**

#### **Project**

I. R. Barabanov<sup>1</sup>, L. B. Bezrukov<sup>1</sup>, A. V. Veresnikova<sup>1</sup>, Yu. M. Gavriilyuk<sup>1</sup>, A. M. Gangapshv<sup>1</sup>, V. I. Gurentsov<sup>1</sup>, V. P. Zavarzina<sup>1</sup>, V. V. Kazalov<sup>2</sup>, S. D. Krokhalva<sup>1, 2</sup>, V. V. Kuz'minov<sup>1</sup>, A. S. Kurlovich<sup>1</sup>, V. Yu. Grishina<sup>1</sup>, B. K. Lubsandorzhiiev<sup>1</sup>, S. B. Lubsandorzhiiev<sup>1</sup>, V. P. Morgalyuk<sup>3</sup>, P. Yu. Naumov<sup>4</sup>, G. Ya. Novikova<sup>1</sup>, A. M. Pshukov<sup>1</sup>, V. V. Sinev<sup>1</sup>, Sh. I. Umerov<sup>1</sup>, E. A. Yanovich<sup>1</sup>, T. Enquist<sup>5</sup>, P. Kuusiniemi<sup>5</sup>, J. Joutsenvaara<sup>5</sup>, A. Virkajarvi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Institute for nuclear researches of Russian academy of sciences, Moscow, Russia,*

<sup>2</sup>*Moscow Institute for Physics and Technology, Moscow, Russia.*

<sup>3</sup>*Institute for element-organic compounds of Russian academy of sciences named A.N. Nesmeyanov, Moscow, Russia,*

<sup>4</sup>*National Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia,*

<sup>5</sup>*Oulu University, Oulu, Finland.*

Large volume scintillation detector is supposed to install at Baksan neutrino observatory INR RAS at Caucasus. The detector will register all possible neutrino fluxes, but mainly geo-neutrinos. In the article the neutrino fluxes are discussed and expected effects in proposed detector are estimated. The design and construction of such a detector is expected to be a part of all the world similar detectors net that is under construction in modern times.