

ДЕТЕКТОР БОЛЬШОГО ОБЪЕМА В БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ РАН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОТОКОВ НЕЙТРИНО НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕО- И АСТРОФИЗИКИ

А. В. Вересникова, И. Р. Барабанов,
Л. Б. Безруков, В. И. Гуренцов, В. В. Синёв*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на Кавказе предлагается установить детектор большого объема, заполненный жидким сцинтиллятором. Масса мишени 10 кг. 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 будут частью мировой сети нейтринных детекторов по изучению природных нейтринных потоков.

Large volume scintillation detector is supposed to be installed at Baksan neutrino observatory of INR RAS at Caucasus. The detector will register all 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.

PACS: 14.60.Lm; 29.40.Mc

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в мире широко обсуждается ряд проектов по созданию крупномасштабных подземных многоцелевых низкофонных сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации редких событий, в частности нейтринных потоков от различных природных источников [2–4].

*E-mail: annaveresnikova@gmail.com

Основные 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 радиогенной составляющей теплового потока Земли;
- 2) исследование спектра солнечных нейтрино (нейтринных осцилляций); поиск солнечных нейтрино от реакций CNO-цикла;
- 3) изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки;
- 4) поиски изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и «черных дыр».

Экзотические задачи:

- 1) проверка гипотезы о протекании в центре Земли цепной реакции деления путем поиска потока антинейтрино «геореактора»;
- 2) оценка содержания калия внутри Земли по спектру электронов отдачи от рассеяния нейтрино на электронах (аналогично солнечным нейтрино).

Прикладная задача: регистрация суммарного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле энергетических ядерных реакторов; изучение осцилляций электронных антинейтрино.

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. Основным препятствием при измерениях являлся тот факт, что внутренний фон детектора обычно значительно превышал исследуемые потоки. Ситуация принципиально изменилась после публикаций результатов, полученных на сцинтилляционном детекторе KamLand в Японии, а затем Vogexino в Италии [1]. Таким образом, стало ясно, что произошел качественный скачок в экспериментальной физике нейтрино низких энергий. Внутренний фон детектора удалось уменьшить в сотни, а то и тысячи раз. При низком фоне можно одновременно измерять несколько потоков, разделяя их энергетическими и временными окнами. Поэтому детектор большого объема, заполненный жидким сцинтиллятором, является многоцелевым прибором.

Кроме внутреннего фона детектора, обусловленного естественной радиоактивностью, существует фон, обусловленный космическими лучами. Поэтому детекторы, предназначенные для измерения малых нейтринных потоков, размещают глубоко под землей.

В настоящее время в ИЯИ РАН ведутся исследования, связанные с разработкой проекта по созданию большого сцинтилляционного детектора в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) [3]. Предполагаемая масса мишени

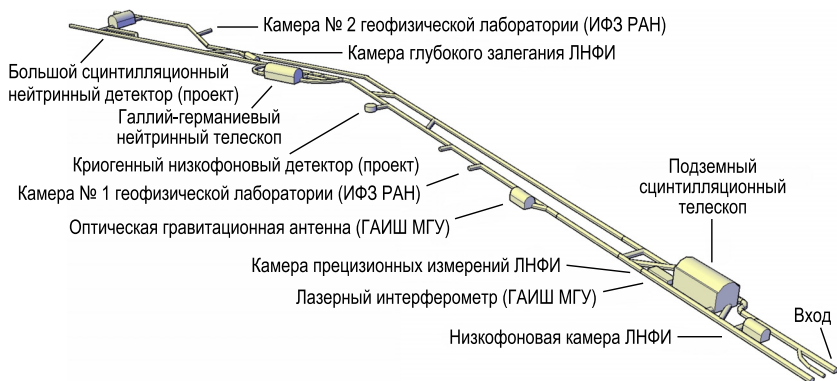


Рис. 1. Структура подземных лабораторий БНО

детектора $\sim 10\text{--}50$ кт. Географические особенности расположения обсерватории позволяют существенно подавить фон, связанный с потоками антинейтрино от работающих реакторов АЭС, по сравнению с другими действующими и проектируемыми экспериментами и в то же время зарегистрировать потоки антинейтрино, несущие информацию о строении земной коры в данном регионе.

Детектор для регистрации нейтрино предполагается разместить в БНО ИЯИ РАН, которая обладает развитой инфраструктурой, базовым научным коллективом, рядом находится поселок для сотрудников.

Структура подземных лабораторий БНО показана на рис. 1. Для создания детектора предполагается построить новый комплекс специализированных подземных помещений. Самое глубокое место находится за галлий-германиевым нейтринным телескопом (4300 м в. э.), где и предполагается разместить детектор.

Для создания детектора с массой мишени 10 кт потребуется два новых 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 под действием космических лучей радиоактивных изотопов. Еще один небольшой зал будет нужен для установки регистрирующей аппаратуры и размещения сотрудников. Всего может потребоваться вынуть около 100 тыс. м³ грунта.

1. КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА НЕЙТРИНО

По своей структуре детектор будет близок к установке KamLAND, отличающаяся от нее большей массой мишени и более глубоким расположением под землей. Схема детектора показана на рис. 2.

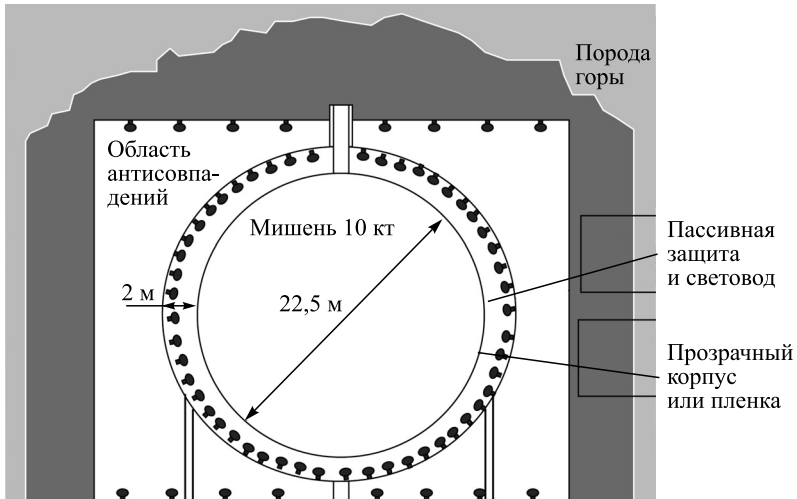


Рис. 2. Схема детектора нейтрино, предлагаемого для установки в Баксанской нейтринной обсерватории

Баксанский детектор антинейтрино предположительно будет состоять из следующих трех концентрических сферических (цилиндрических) зон:

- центральная зона диаметром около 22,5 м, заполненная жидким органическим сцинтиллятором и служащая мишенью для антинейтрино;

- вторая концентрическая зона толщиной 2 м, заполненная несцинтиллирующей органической жидкостью для подавления фона от фотоумножителей. Зона отделена от мишени прочной прозрачной пленкой (типа нейлона) или корпусом из оргстекла. Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или другие фотоприемники для просмотра мишени устанавливаются на поверхности второй зоны;

- внешняя зона детектора — зона антисовпадений и защиты от радиоактивных излучений грунта. 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 составлять около 33 м.

Рассматривается возможность применения в качестве фотоприемников как обычных вакуумных ФЭУ, так и матриц из кремниевых ФЭУ, которые позволяют значительно упростить конструкцию детектора, поскольку имеют меньше радиоактивных загрязнений.

В качестве возможных вариантов мишени из жидкого органического сцинтиллятора рассматриваются композиции, приготовленные на основе чи-

стого ЛАБа (линейного алкилбензола). Коллаборация SNO+ предполагает использовать аналогичный растворитель (или его смеси с другими жидкими растворителями). Сцинтиллятор должен иметь высокую сцинтилляционную эффективность и быть прозрачным, чтобы обеспечить хорошее энергетическое разрешение.

В детекторе будут регистрироваться коррелированные во времени и пространстве световые сигналы от позитрона и от γ -кванта захвата нейтрона реакции.

2. ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Изучение потока антинейтрино, излучаемого дочерними продуктами распада урана и тория (геонейтрино), содержащимися внутри Земли, и определение радиогенной составляющей теплового потока Земли. Согласно современным представлениям, Земля состоит из нескольких внутренних слоев [5]: земной коры, верхней и нижней мантии, разделенных переходной зоной, и внешнего и внутреннего ядра.

Существенной особенностью внутреннего строения Земли является геотермальное тепло.

Полный поток составляет (47 ± 2) Вт, что примерно в 1000 раз больше, чем мощность всех земных электростанций [6].

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.

Измерения потоков геонейтрино могут дать информацию о внутренней структуре Земли, процессах, протекающих в ее недрах, о распределении источников радиогенного тепла в глубоких слоях земной коры, мантии и центральных областях Земли и подтвердить или уточнить различные гипотезы о формировании планет.

Ожидаемые скорости счета от потоков геонейтрино представлены в табл. 1.

Место расположения БНО является одним из лучших для решения поставленной задачи, поскольку фон реакторных нейтрино составляет всего 0,2 от ожидаемого сигнала.

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			$R = \frac{N_{\text{reactor}}}{N_{\text{geo}}}$
		[2]	[7]	Наш результат	
Гавайи (США)	4000	13,4	12,5	23,9	0,1
Камиока (Япония)	2700	31,6	34,8	36,8	6,7
Гран-Сассо (Италия)	3700	40,5	40,5	42,4	0,9
Садбери (Канада)	6000	47,9	49,6	49,6	1,1
Пюхасалми (Финляндия)	4000	49,9	52,4	51,4	0,5
Баксан (Россия)	4800	50,7	51,9	53,3	0,2
Джинпин (Китай)	6700	55,7	—	56,0	0,28

2.2. Исследование спектра солнечных нейтрино (нейтринных осцилляций). Поиск солнечных нейтрино от реакций CNO-цикла. Проблема металличности. Современные наблюдения солнечной фотосферы показывают меньшее содержание металлов по сравнению с более ранними наблюдениями. Новые солнечные модели низкой металличности предсказывают несколько иное соотношение потоков солнечных нейтрино (СН) по сравнению со Стандартной солнечной моделью (табл. 2) [7, 8].

Решающее значение здесь будет играть наблюдение CNO-нейтрино. Более аккуратное измерение потоков СН позволит не только уточнить параметры

Таблица 2. Ожидаемая скорость событий для всех компонентов СН в моделях высокой и низкой металличности

Компонент СН	Скорость электронных событий, сут ⁻¹ · кг ⁻¹			
	> 0 кэВ		> 220 кэВ	
	Высокая металличность	Низкая металличность	Высокая металличность	Низкая металличность
pp	1325,9 ± 8,0	1337 ± 8	45,57 ± 0,27	45,95 ± 0,28
${}^7\text{Be}$ (0,38 МэВ)	19,3 ± 1,3	17,6 ± 1,2	2,28 ± 0,16	2,08 ± 0,15
${}^7\text{Be}$ (0,86 МэВ)	469 ± 33	428 ± 30	316 ± 22	288 ± 20
pep	27,35 ± 0,33	27,92 ± 0,34	22,44 ± 0,27	22,91 ± 0,28
${}^{13}\text{N}$	24,5 ± 3,4	18,0 ± 2,5	14,8 ± 2,1	10,9 ± 1,5
${}^{15}\text{O}$	27,8 ± 4,2	19,50 ± 0,29	20,3 ± 3,1	14,2 ± 2,1
${}^{17}\text{F}$	0,69 ± 0,12	0,426 ± 0,072	0,506 ± 0,086	0,312 ± 0,053
${}^8\text{B}$	4,43 ± 0,62	3,64 ± 0,51	4,27 ± 0,60	3,51 ± 0,49
hep	0,009 ± 0,003	0,009 ± 0,003	0,009 ± 0,003	0,009 ± 0,003

солнечной модели, но и исследовать возможные временные флуктуации возникновения солнечной энергии.

pp-нейтрино. Эффективность регистрации *pp*-нейтрино, как видно из табл. 2, очень сильно зависит от порога регистрации. Проблема состоит в том, что в составе сцинтиллятора присутствует изотоп ^{14}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 ^{14}C , используя сцинтилляционные детекторы разного объема. Расчеты показывают, что если образование ^{14}C в исходной нефти связано с реакциями под действием естественных радиоактивных элементов, то могут существовать нефти с содержанием ^{14}C на 3 порядка меньше 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 Borexino установлен верхний предел на поток CNO-нейтрино, превышающий ожидаемое значение по стандартной модели в 2 раза. Основная проблема состоит в образовании в сцинтиляторе детектора изотопа ^{11}C при прохождении через него мюонов. В планируемом в БНО эксперименте интенсивность потока мюонов в 10 раз ниже по сравнению с Гран-Сассо, и в совокупности с большей статистикой детектор массой в несколько килотонн позволит измерить поток CNO-нейтрино (^{15}O) с точностью не хуже 30 % в предположении фоновых условий Borexino.

Нер-нейтрино. Нер-нейтрино ($^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$ ($E_\nu < 18,8$ МэВ)) обладают наивысшей энергией среди всех источников СН. Поиск Нер-нейтрино важен с точки зрения солнечной модели, насколько точно он предсказывается, возможно обнаружить по изучению формы спектра борных нейтрино в области верхней границы.

Эффект Михеева–Смирнова–Вольфенштейна (МСВ) для солнечных нейтрино. Современная ситуация с экспериментальной проверкой эффекта МСВ представлена на рис. 3 [10]. Из рисунка видно, что в пределах погрешностей существует согласие экспериментальных данных с предсказанием эффекта МСВ. Но погрешности 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.

Повышение на порядок статистики для ^7Be - и *pp*-нейтрино и наблюдение CNO-нейтрино позволят уменьшить современные неопределенности как минимум в несколько раз при фоновых условиях Borexino.

Возможность уточнения параметров θ_{12} и Δm_{21}^2 . В настоящее время существует расхождение в пределах 2σ между значениями Δm_{21}^2 , получае-

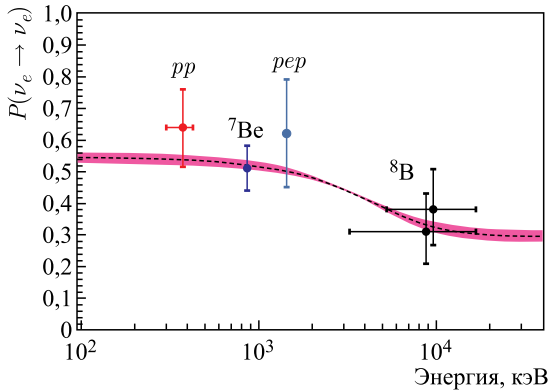


Рис. 3. Вероятность осцилляций (эффект МСВ) в зависимости от энергии для солнечных нейтрино и экспериментальные данные [6]

мыми 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–Сабаты и предоставить тест для проверки СР-инвариантности. Точное измерение θ_{12} позволит улучшить значение нижней границы массы нейтрино в двойном безнейтринном бета-распаде в случае обратной иерархии нейтринных масс.

Асимметрия день/ночь, связанная с эффектом МСВ. 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 2σ ($\sigma = 2,7\%$) получено в эксперименте SK [11]. Этот эффект очень чувствителен к точному значению Δm_{21}^2 , профилю плотности и увеличивается с возрастанием энергии. Асимметрия нейтринного потока день/ночь определяется как

$$S = 2 \frac{(N - D)}{(N + D)}, \quad (1)$$

где N и D — число событий в ночное и дневное время. Согласно сделанным оценкам значение S находится в пределах 1–3% [12, 13].

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.

2.3. Изучение динамики взрыва сверхновых путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки. Все это позволяет уточнить динамику коллапса и внутреннее строение звезд.

Одно из назначений этой системы — послать предупреждение астрономам об ожидаемой вспышке сверхновой.

2.4. Поиски изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной за миллиарды лет при гравитационных коллапсах ядер массивных звезд и образовании нейтронных звезд и «черных дыр». Эти данные позволяют уточнить процессы, происходящие в ранней Вселенной. Эта задача в последнее время становится наиболее актуальной наряду с регистрацией солнечных нейтрино.

Далее укажем *экзотические задачи*.

2.5. Проверка гипотезы о протекании в центре Земли цепной реакции деления путем поиска потока антинейтрино «геореактора». Существование радиоактивных элементов в толще Земли не дает объяснения современному значению полного теплового потока из недр Земли. Также эта модель не объясняет источник энергии магнитного поля Земли и периодическую смену магнитных полюсов.

Марвин Герндон предложил [14] для объяснения магнитного поля наличие природного ядерного реактора в центре Земли.

Гипотеза геореактора может быть непосредственно проверена с помощью спектрометра в БНО. Скорость счета от геореактора ожидается 80–260 событий в год при эффективности регистрации 100 % и с учетом осцилляций.

2.6. Оценка содержания калия внутри Земли по спектру электронов отдачи от рассеяния нейтрино на электронах (аналогично солнечным нейтрино). Регистрация калия или ограничение на его концентрацию позволит проверить некоторые экзотические модели строения и происхождения Земли.

И наконец, остановимся на *прикладной задаче*.

2.7. Регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле энергетических ядерных реакторов. Изучение осцилляций электронных антинейтрино. Сеть установок, подобных детектору БНО, поможет осуществить контроль за всеми атомными реакторами на Земле. Реакторные нейтрино являются неустрашимым фоном при регистрации геонейтрино [15]. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная стратегия развития нейтринной гео- и астрофизики состоит в создании сети подземных обсерваторий с крупными многоцелевыми экспериментальными установками, что позволит решить целый ряд фундаменталь-

ных задач нейтринной физики и астрофизики низких энергий. Рассмотрена программа изучения природных потоков нейтрино и свойств нейтрино в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с помощью спектрометра с массой мишени из 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Araki T., Enomoto S., Furuno K., Gando Y., Ichimura K., Ikeda H., Inoue K., Kishimoto Y., Koga M., Koseki Y., Maeda T., Mitsui T., Motoki M., Nakajima K., Ogawa H., Ogawa M., Owada K., Ricol J. S., Shimizu I., Shirai J., Suekane F., Suzuki A., Tada K., Takeuchi S., Tamae K., Tsuda Y., Watanabe H., Busenitz J., Classen T., Djurcic Z., Keefer G., Leonard D., Piepke A., Yakushev E., Berger B. E., Chan Y. D., Decowski M. P., Dwyer D. A., Freedman S. J., Fujikawa B. K., Goldman J., Gray F., Heeger K. M., Hsu L., Lesko K. T., Luk K. B., Murayama H., O'Donnell T., Poon A. W., Steiner H. M., Winslow L. A., Mauger C., McKeown R. D., Vogel P., Lane C. E., Miletic T., Guillian G., Learned J. G., Maricic J., Matsuno S., Pakvasa S., Horton-Smith G. A., Dazeley S., Hatakeyama S., Rojas A., Svoboda R., Dieterle B. D., Detwiler J., Gratta G., Ishii K., Tolich N., Uchida Y., Batygov M., Bugg W., Efremenko Y., Kamyshev Y., Kozlov A., Nakamura Y., Karwowski H. J., Markoff D. M., Nakamura K., Rohm R. M., Tornow W., Wendell R., Chen M. J., Wang Y. F., Piquemal F. // *Nature*. 2005. V. 436(7050). P. 499–503.
2. Wurm M., Beacom J. F., Bezrukov L. B., Bick D., Blümer J., Choubey S., Ciemiak Ch., D'Angelo D., Dasgupta B., Dighe A., Domogatsky G., Dye S., Eliseev S., Enqvist T., Erykalov A., von Feilitzsch F., Fiorentini G., Fischer T., Göger-Neff M., Grabmayr P., Hagner C., Hellgartner D., Hissa J., Horiuchi Sh., Janka H.-T., Jaupart C., Jochum J., Kalliokoski T., Kuusiniemi P., Lachenmaier T., Lazanu I., Learned J. G., Lewke T., Lombardi P., Lorenz S., Lubsandorzhiev B., Ludhova L., Loo K., Maalampi J., Mantovani F., Marafini M., Maricic J., Undagoitia T. M., McDonough W. F., Miramonti L., Mirizzi A., Meindl Q., Mena O., Möllenberg R., Nahnhauser R., Nesterenko D., Novikov Y. N., Nuijten G., Oberauer L., Pakvasa S., Palomares-Ruiz S., Pallavicini M., Pascoli S., Patzak T., Peltoniemi J., Potzel J., Rähö T., Raffelt G. G., Ranucci G., Razaque S., Rummukainen K., Sarkamo J., Sinev V., Spiering Ch., Stahl A., Thorne F., Tippmann M., Tonazzo A., Trzaska W. H., Vergados J. D., Wiebusch Ch., Winter J. The Next-Generation Liquid-Scintillator Neutrino Observatory LENA. arXiv:1104.5620[astro-ph.IM].
3. Барабанов И. П., Новикова Г. Я., Синева В. В., Янович Е. А. Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН 1228/2009. М., 2009.
4. Beacom J. F., Chen Sh., Cheng J., Doustimotlagh S. N., Gao Y., Ge Sh.-F., Gong G., Gong H., Guo L., Han R., Huang X., Li Jianmin, Li Jin, Li M., Li X., Lin G.-L., Liu Z.,

- McDonough W., Tang J., Wan L., Wang Y., Wang Zh., Wang Z., Wei H., Xi Y., Xu Y., Yang Zh., Yao Ch., Yeh M., Yue Q., Zhang L., Zhang Y., Zhao Z., Zheng Y., Zhou X., Zhu X., Zuber K. Letter of Intent: Jinping Neutrino Experiment. arXiv:1602.01733 v2.
5. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983.
 6. Davies J. H., Davies D. R. Earth's Surface Heat Flux // *Solid Earth*. 2010. V. 1, No. 1. P. 5.
 7. Serenelli A., Haxton W. C., Peña-Garay C. // *Astrophys. J.* 2011. V. 743. P. 24.
 8. Serenelli A., Basu S., Ferguson J. W., Asplund M. // *Astrophys. J.* 2009. V. 705. P. L123.
 9. Barabanov I., Bezrukov L., Resconi E., Schonert S. The ^{14}C Abundance in Liquid Organic Scintillators and Oil. Preprint INR-1316/2012. Moscow, 2012.
 10. Smirnov O. Y., Agostini M., Appel S., Bellini G., Benziger J., Bick D., Bonfini G., Bravo D., Caccianiga B., Calaprice F., Caminata A., Cavalcante P., Chepurinov A., Choi K., D'Angelo D., Davini S., Derbin A., Di Noto L., Drachnev I., Empl A., Etenko A., Fomenko K., Franco D., Gabriele F., Galbiati C., Ghiano C., Giammarchi M., Goeger-Neff M., Goretti A., Gromov M., Hagner C., Hungerford E., Ianni Al., Ianni An., Jędrzejczak K., Kaiser M., Kobychew V., Korablev D., Korga G., Kryn D., Laubenstein M., Lehnert B., Litvinovich E., Lombardi F., Lombardi P., Ludhova L., Lukanichenko G., Machulin I., Manecki S., Maneschg W., Marcocci S., Meroni E., Meyer M., Miramonti L., Misiaszek M., Mosteiro P., Muratova V., Neumair B., Oberauer L., Obolensky M., Ortica F., Otis K., Pagani L., Pallavicini M., Papp L., Perasso L., Pocar A., Ranucci G., Razeto A., Re A., Romani A., Roncin R., Rossi N., Schönert S., Semenov D., Simgen H., Skorokhvatov M., Sotnikov A., Sukhotin S., Suvorov Y., Tartaglia R., Testera G., Thurn J., Toropova M., Unzhakov E., Vogelaar R. B., von Feilitzsch F., Wang H., Weinz S., Winter J., Wojcik M., Wurm M., Yokley Z., Zaimidoroga O., Zavatarelli S., Zuber K., Zuzel G. Measurement of Neutrino Flux from the Primary Proton-Proton Fusion Process in the Sun with Borexino Detector. arXiv:1507.02432v1[hep-ex].
 11. Fukuda Y. et al. (*Super-Kamiokande Collab.*). Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super Kamiokande's First 300 Days // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 1158–1162.
 12. Renshaw A. et al. (*Super-Kamiokande Collab.*) // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 112. P. 091805.
 13. Bahcall J. N., Krastev P. I., Smirnov A. Yu. // *Phys. Rev. D.* 1999. V. 60. P. 093001.
 14. Herndon J. M. // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1993. V. 45. P. 423; *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2003. V. 100. P. 3047; arXiv:0707.4161[physics.geo-ph].
 15. Синев В. В. Потоки антинейтринного излучения от ядерных реакторов в предполагаемых местах постройки детектора для регистрации геонейтрино. Препринт ИЯИ-1396/2015. М., 2015.