

# ЭКСПЕРИМЕНТ НЕЙТРИНО-4 ПО ПОИСКУ СТЕРИЛЬНОГО НЕЙТРИНО НА РЕАКТОРЕ СМ-3

*А. П. Серебров<sup>a\*</sup>, В. Г. Ивочкин<sup>a</sup>, Р. М. Самойлов<sup>a</sup>, А. К. Фомин<sup>a</sup>, В. Г. Зиновьев<sup>a</sup>,  
П. В. Неустроев<sup>a</sup>, В. Л. Головцов<sup>a</sup>, Н. В. Грузинский<sup>a</sup>, В. А. Соловей<sup>a</sup>, А. В. Чёрный<sup>a</sup>,  
О. М. Жеребцов<sup>a</sup>, В. П. Мартемьянов<sup>b</sup>, В. Г. Циноев<sup>b</sup>, В. Г. Тарасенков<sup>b</sup>, В. И. Алёшин<sup>b</sup>,  
А. Л. Петелин<sup>c</sup>, С. В. Павлов<sup>c</sup>, А. Л. Ижутов<sup>c</sup>, С. А. Сазонтов<sup>c</sup>, Д. К. Рязанов<sup>c</sup>,  
М. О. Громов<sup>c</sup>, В. В. Афанасьев<sup>c</sup>, Л. Н. Матросов<sup>a</sup>, М. Ю. Матросова<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина»  
188300, Гатчина, Россия

<sup>b</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
123182, Москва, Россия

<sup>c</sup> ОАО «ГНЦ НИИАР»  
433510, Димитровград, Россия

Поступила в редакцию 25 марта 2015 г.

В связи с вопросом о возможности существования стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 с моделью детектора Нейтрино-4 проведены пробные измерения зависимости потока реакторных антинейтрино от расстояния до активной зоны реактора в диапазоне 6–11 м. Обсуждаются перспективы поиска осцилляций реакторных антинейтрино на малых расстояниях.

DOI: 10.7868/S004445101510003X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно обсуждается возможность существования стерильного нейтрино, имеющего значительно меньшее сечение взаимодействия с веществом, чем, например, электронные антинейтрино от реактора. Предполагается, что благодаря переходу реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на малых расстояниях от реактора и дефицит потока реакторных антинейтрино на больших расстояниях [1, 2]. Кроме того, стерильные нейтрино рассматриваются в качестве кандидатов на темную материю.

Отношение наблюдаемого в экспериментах нейтринного потока к предсказанному потоку оценивается как  $0.927 \pm 0.023$  [1]. Данный эффект составляет три стандартных отклонения. Этого еще недостаточно, чтобы иметь уверенность в существовании реакторной антинейтринной аномалии. Метод сравнения

измеренного потока антинейтрино с ожидаемым потоком от реактора является неудовлетворительным из-за проблем точного вычисления потока антинейтрино из реактора и эффективности детектора антинейтрино.

Идея осцилляций может быть проверена прямыми измерениями эффекта вариации потока и спектра антинейтрино на малых расстояниях от реактора. Детектор должен перемещаться, а также быть спектрально-чувствительным. В нашем эксперименте ставится задача подтвердить или опровергнуть на определенном уровне точности возможность существования стерильного нейтрино. Для поиска осцилляций в стерильное нейтрино необходимо зарегистрировать вариацию потока реакторных антинейтрино. Если такой процесс существует, то он может описываться уравнением осцилляций:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2(2\theta_{14}) \times \\ \times \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\bar{\nu}} [\text{МэВ}]} \right), \quad (1)$$

\*E-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

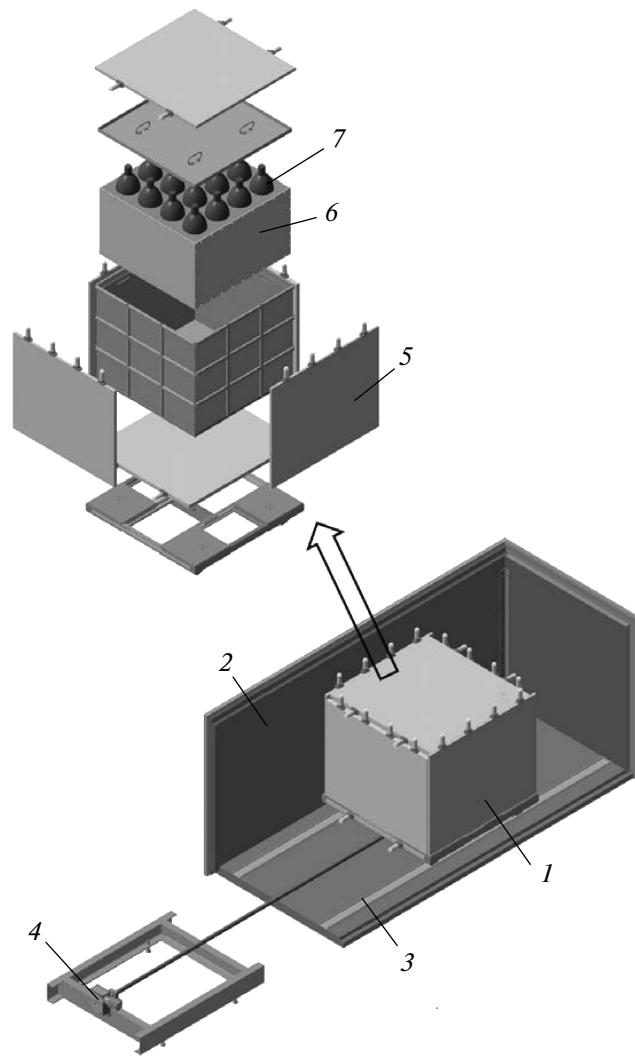
где  $E_{\bar{\nu}}$  — энергия антинейтрино, а неизвестными являются параметры осцилляций  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2(2\theta_{14})$  [1].

Для осуществления эксперимента необходимо провести измерения потока антинейтрино и спектра на малых расстояниях, например 6–12 м от практически точечного источника антинейтрино.

Нами была изучена возможность постановки новых экспериментов на исследовательских реакторах России. Именно исследовательские реакторы необходимы для этих экспериментов, так как они обладают компактной активной зоной и достаточно малым расстоянием до возможного места размещения нейтринного детектора. К сожалению, в зале пучков исследовательского реактора имеется достаточно большой фон нейтронов и гамма-квантов, который весьма затрудняет постановку низкофоновых нейтринных экспериментов. Наилучшие условия для проведения эксперимента по поиску нейтринных осцилляций на малых расстояниях существуют на реакторе СМ-3 из-за некоторых особенностей его конструкции.

## 2. МОДЕЛЬ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ НА РЕАКТОРЕ СМ-3

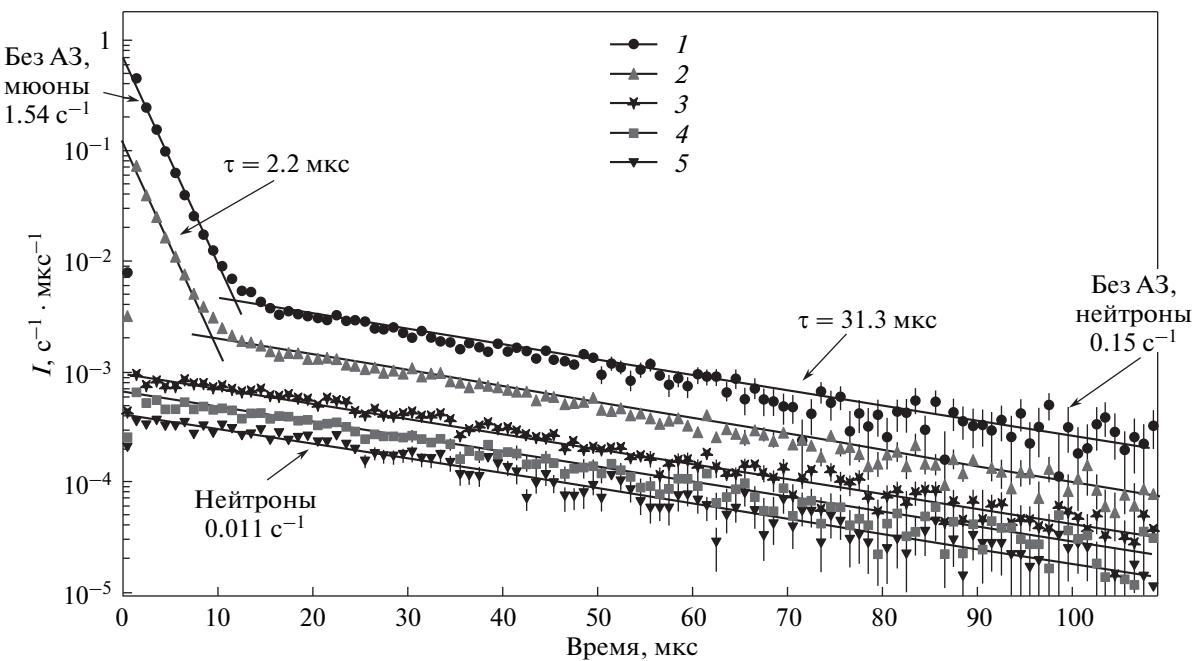
С целью подготовки к эксперименту Нейтрино-4 на реакторе СМ-3 мы выполнили экспериментальные исследования на модели детектора Нейтрино-4 на реакторе ВВР-М [3–6]. Задачей эксперимента являлась регистрация антинейтрино от реактора в условиях значительного фона космического излучения на поверхности Земли, а также в условиях нейтронного фона и гамма-фона в экспериментальном зале исследовательского реактора. Исследовалась принципиальная возможность постановки такого эксперимента на реакторе СМ-3. Эксперимент показал, что основную проблему составляет фон космического излучения, дающий коррелированные события, которые трудно отличить от событий регистрации реакторных антинейтрино. Нейтронный фон и гамма-фон экспериментального зала могут быть подавлены на 4–5 порядков величины пассивной защитой из свинца, борированного полиэтилена и бетона. Важно отметить, что оптимальной последовательностью размещения слоев защиты является следующая: бетон снаружи, далее свинец и затем борированный полиэтилен внутри. Внутренний слой борированного полиэтилена является обязательным, чтобы защититься от нейтронов, рожденных мюонами на свинце, тем более, что этот процесс может давать коррелированные события.



**Рис. 1.** Схема детектора: 1 — детектор реакторных антинейтрино, 2 — пассивная защита из свинца (6 см) и борированного полиэтилена (16 см), 3 — рельсы, 4 — устройство для перемещения детектора, 5 — пластины активной защиты, 6 — жидкий сцинтиллятор, 7 — ФЭУ

После испытаний модель детектора была перенесена на реактор СМ-3.

Схема модели детектора Нейтрино-4 представлена на рис. 1. Объем детектора  $0.9 \times 0.9 \times 0.5$  м<sup>3</sup> заполнен жидким сцинтиллятором с добавкой гадолиния. В детекторе используется 16 фотоэлектронных умножителей ФЭУ-49Б, расположенных на верхней поверхности детектора. Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ . Сначала детектор регистрирует позитрон, энергия которого определяется энергией



**Рис. 2.** Временные спектры при различных конфигурациях активной защиты (АЗ): 1 — нет активной защиты, 2 — включено шесть пластин активной защиты, 3 — то же + запреты от детектора при сигналах с энергией выше 12 МэВ, 4 — то же + запреты на 100 мкс после появления сигнала в детекторе с энергией более 12 МэВ или после сигнала в активной защите, 5 — то же + ограничение мгновенных и задержанных сигналов диапазонами соответственно 3–9 МэВ и 3–12 МэВ

антинейтрино, а также регистрирует два аннигиляционных гамма-кванта с энергией по 511 кэВ. Возникающий в реакции нейтрон поглощается гадолинием ( $Gd$ ) с образованием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. В детекторе регистрируется два последовательных сигнала от позитрона и нейтрона (коррелированные события).

Спектр антинейтрино восстанавливается из спектра позитронов, так как в первом приближении связь между энергией позитрона и антинейтрино линейна:  $E_{\bar{\nu}} = E_{e^+} + 1.8$  МэВ. Материал сцинтиллятора — минеральное масло с добавкой  $Gd$  1 г/л. Светоизлучение сцинтиллятора ВС 525 составляет  $10^4$  фотонов на 1 МэВ. Детектор окружен шестью сцинтилляционными пластинами  $0.9 \times 0.9 \times 0.03$  м $^3$  с ФЭУ, являющимися активной защитой от космических мюонов. После проведения пробных экспериментов на реакторе ВВР-М исследования модели нейтринного детектора были перенесены на реактор СМ-3, где к этому времени было подготовлено помещение нейтринной лаборатории и пассивная защита детектора [7, 8].

Реактор СМ-3 находится на поверхности земли. Его здания имеют мощные бетонные стены. Эффек-

тивность пассивной защиты самого здания от мюонов составляет от 4 до 12 м водного эквивалента в зависимости от направления по отношению к вертикали. Конфигурация бетонной защиты здания реактора СМ-3 представлена в работах [7, 8]. В помещении нейтринной лаборатории была установлена пассивная защита самого детектора из свинца (6 см) и борированного полиэтилена (16 см), предназначенная для того, чтобы подавить нейтронный фон и гамма-фон [7, 8].

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА СМ-3 И ЕГО ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ

#### 3.1. Энергетические и временные спектры коррелированных событий

Как уже отмечалось ранее, для измерения потока антинейтрино от реактора используется метод задержанных совпадений, чтобы выделить процесс регистрации антинейтрино:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ . Временной спектр задержанных совпадений показан на рис. 2. Фон случайных совпадений вычен. Можно видеть

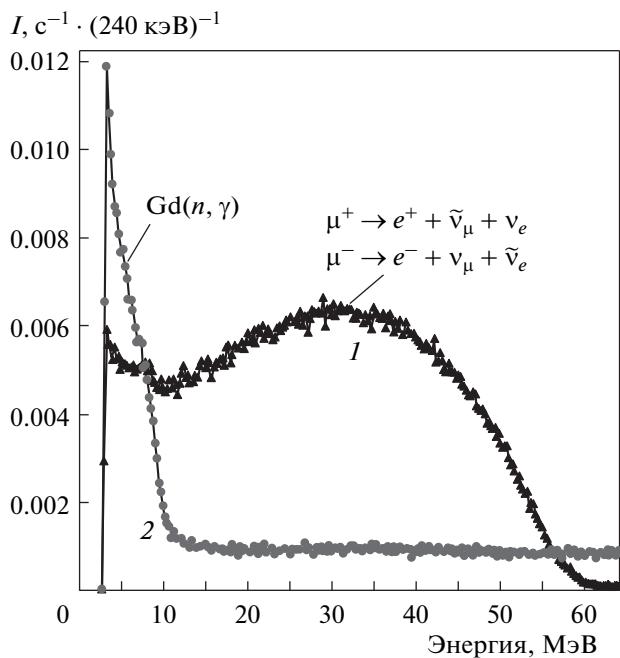


Рис. 3. Энергетические спектры задержанных сигналов в промежутках 0–10 мкс (1) и 10–100 мкс (2)

две экспоненты (прямые линии в логарифмическом масштабе), которые соответствуют распаду мюонов и захвату нейтронов гадолинием.

Без использования активной защиты интеграл под первой экспонентой соответствует скорости остановок мюонов  $1.54 \mu/\text{с}$ , а показатель экспоненты (2.2 мкс) соответствует времени жизни мюона. Интеграл под второй экспонентой соответствует скорости захвата нейтронов в детекторе  $0.15 n/\text{с}$ , а показатель экспоненты (31.3 мкс) соответствует времени жизни в сцинтилляторе при концентрации гадолиния 0.1 %. Число остановок мюонов в секунду соответствует оценке из расчета потока мюонов и массы сцинтиллятора, а число захваченных за секунду нейтронов соответствует расчетной скорости образования нейтронов в самом детекторе из-за мюонного потока, проходящего через него. Это указывает на то, что с помощью пассивной защиты в комбинации свинец снаружи и 16 см борированного полиэтилена внутри поставленная задача в основном решена. Действительно, добавление 10 см борированного полиэтилена на крышку детектора не привело к изменению скорости захвата нейтронов в детекторе. Использование запретов от активной защиты и самого детектора, которые свидетельствуют о прохождении мюона, позволяет подавить скорость сче-

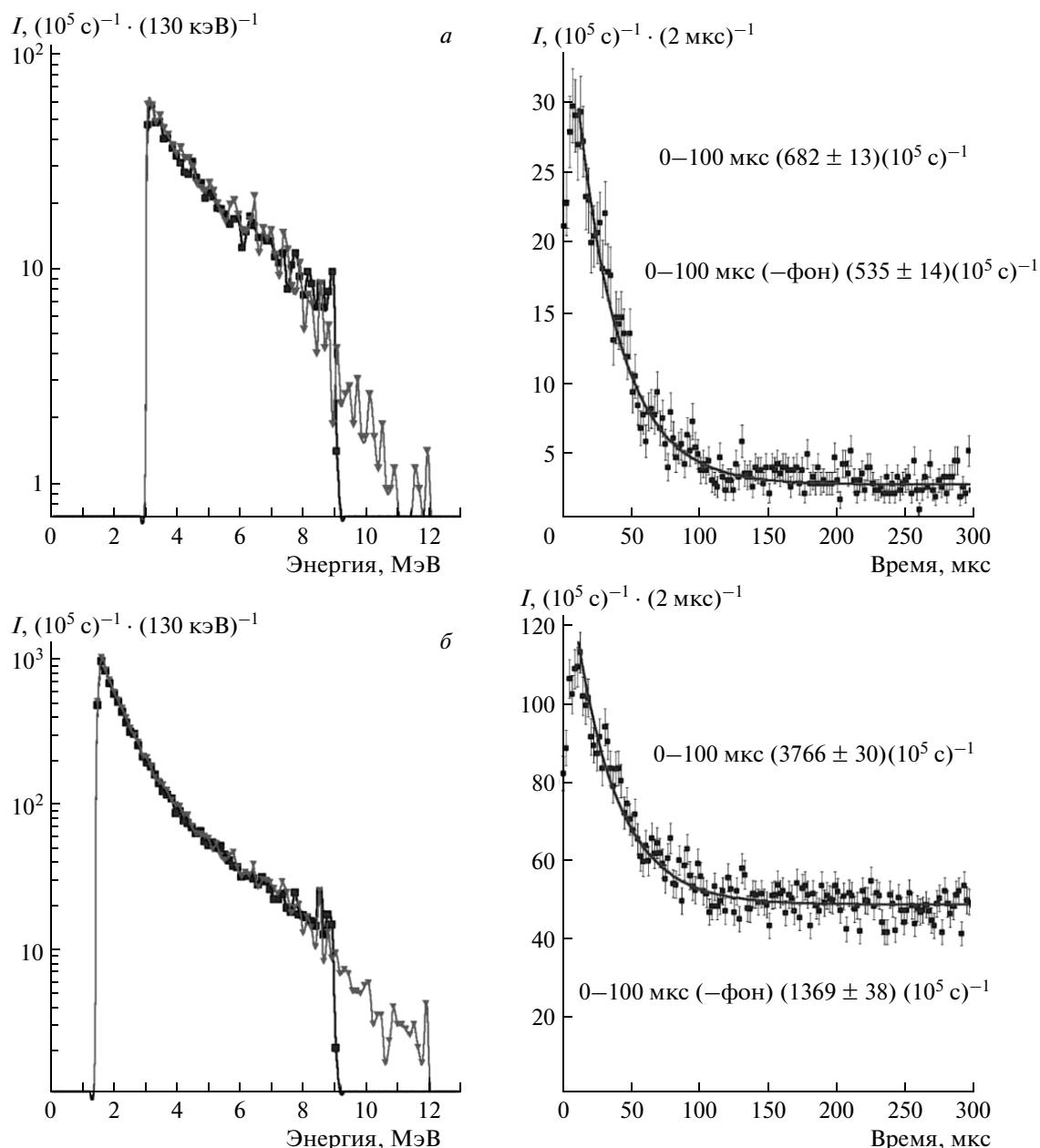
та коррелированных нейтронных событий до уровня  $1.8 \cdot 10^{-2} n/\text{с}$ . На рис. 2 представлен первый вариант активной защиты. Подробные исследования активной защиты представлены в следующем разделе.

На рис. 3 показан энергетический спектр задержанных сигналов во временном окне от 0 до 10 мкс и энергетический спектр задержанных сигналов во временном окне от 10 до 100 мкс. Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы. Выбирая временной интервал от 0 до 10 мкс, мы выделяем процесс остановок мюонов в детекторе, при этом видно, что спектр продуктов распада закрывает диапазон от 0 до 50 МэВ, т. е. соответствует непрерывному спектру электронов (позитронов) и гамма-квантов при распаде мюона. При выборе временного интервала задержанных совпадений от 10 до 100 мкс мы получаем спектр задержанных сигналов в диапазоне 2–8 МэВ, который соответствует спектру гамма-излучения при захвате нейтрона гадолинием. Горизонтальный участок спектра выше 8 МэВ связан с фоном случайных совпадений.

Важнейшим вопросом эксперимента является возможность выделения коррелированных событий на фоне случайных совпадений. Ставилась задача выделить такое событие, при котором первый сигнал был зарегистрирован только в детекторе (позитрон), а второй – задержанный сигнал – также только в детекторе (нейtron) во временном интервале, связанном с временем жизни нейтрона в сцинтилляторе с гадолинием.

На рис. 4 представлены примеры измерения коррелированного сигнала. Схема записи и обработки сигналов состояла в следующем. В режиме реального времени записывались сигналы от нейтринного детектора и пластина активной защиты. Форма сигналов оцифровывалась с шагом 15 нс. При отборе событий выбирался текущий сигнал нейтринного детектора в заданном энергетическом интервале (по амплитуде), проверялось отсутствие запретов от активной защиты, т. е. отсутствие совпадений сигналов во временном окне 100 нс. Задержанные сигналы также выбирались в своем заданном энергетическом интервале. Кроме того, вводились запреты на все сигналы детектора в течение 100 мкс после появления сигнала в детекторе выше указанного уровня или после сигнала в активной защите. Такие запреты оказались полезными для подавления событий, связанных с космическим фоном.

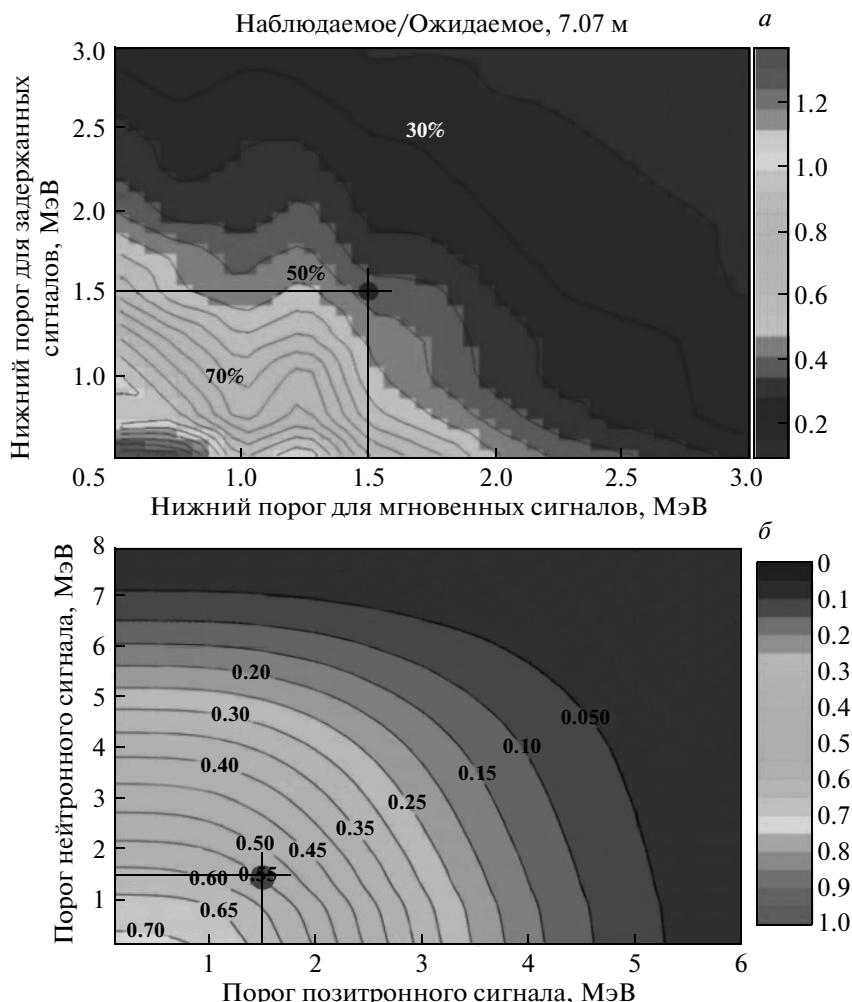
На рис. 4 показан пример такой обработки данных. Отбор коррелированных совпадений проводился в интервале 300 мкс после выбранного импульса нейтринного детектора, причем последние



**Рис. 4.** Энергетические и временные спектры мгновенных и задержанных сигналов: *а*) пороги мгновенных и задержанных сигналов соответственно 3–9 МэВ (квадраты) и 3–12 МэВ (треугольники), для временного спектра указана скорость счета коррелированных событий в интервале 0–100 мкс без учета случайных совпадений и с учетом случайных совпадений; *б*) то же для порогов 1.5–9 МэВ (квадраты) и 1.5–12 МэВ (треугольники)

100 мкс были предназначены для измерения фона случайных совпадений. При нижнем пороге первого (мгновенного) и второго (задержанного) сигналов 3 МэВ вклад случайных совпадений достаточно мал (рис. 4*a*, справа). Во временном спектре задержанных совпадений виден сигнал коррелированных событий, описываемый экспонентой с показателем

31.3 мкс, который точно совпадает с временем жизни нейтрона в данном сцинтилляторе с гадолинием. (Такая же кривая задержанных совпадений с таким же экспоненциальным показателем была получена в калибровочном эксперименте с нейтронным источником  $^{252}\text{Cf}$ ). Вклад фона случайных совпадений во временном интервале 0–100 мкс составляет 27 %.



**Рис. 5.** *a)* Экспериментальная эффективность регистрации антинейтринных событий в зависимости от нижних порогов регистрации мгновенных и задержанных сигналов. *б)* Эффективность регистрации антинейтринных событий из расчета методом Монте-Карло в зависимости от нижних порогов регистрации позитронных и нейтронных сигналов

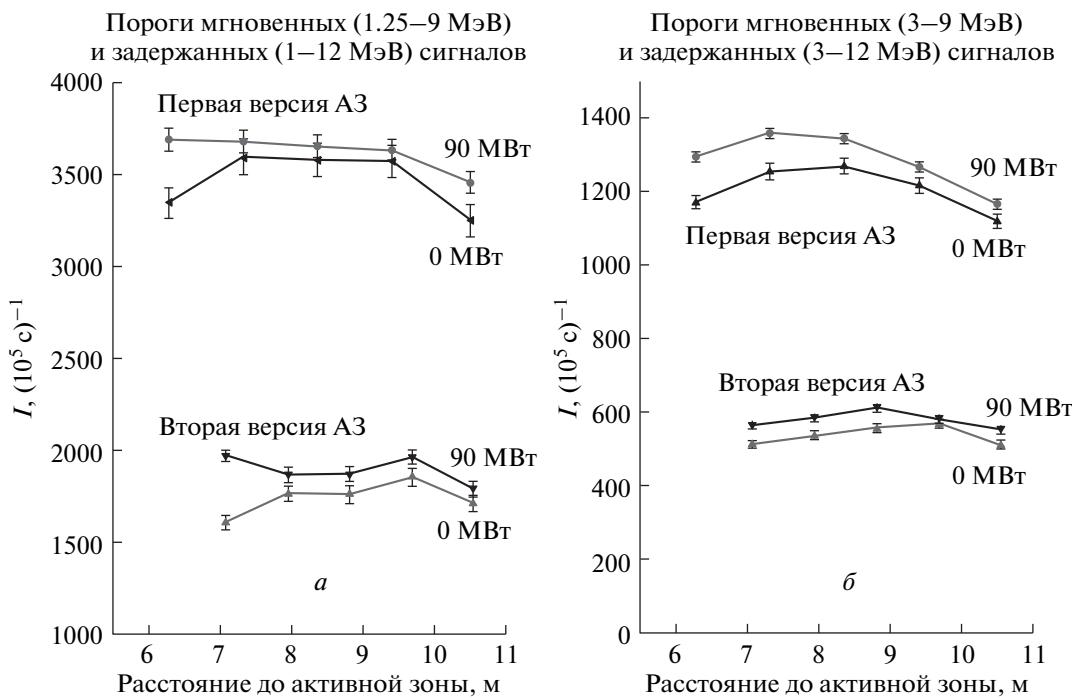
При понижении нижнего порога до 1.5 МэВ увеличивается число случайных совпадений, но растет число коррелированных событий (рис. 4б). Тем не менее, точность выделения коррелированного сигнала не растет. Вклад фона случайных совпадений во временным интервале 0–100 мкс составляет уже 175 %. Это происходит из-за фона радиоактивных загрязнений в низкоэнергетической части спектра. К сожалению, его снижение пока не представляется возможным. Однако следует заметить, что более важной проблемой является коррелированный фон, связанный с космическим излучением — мюонами и быстрыми нейtronами. Выделение искомых нейтринных событий возможно в виде разности скорости счета при выключении (включении) реактора.

Ожидаемая скорость счета нейтринных событий

вычисляется следующим соотношением:

$$n_\nu = \left( \frac{W_{eff}}{E_{eff}} \right) (4\pi R^2)^{-1} N_p \sigma_f \varepsilon, \quad (2)$$

где  $W_{eff}$  — тепловая мощность реактора,  $E_{eff}$  — энерговыделение на акт деления, включая прямые и задержанные процессы,  $R = 7.07$  м — расстояние от активной зоны реактора до центра детектора,  $N_p$  — число протонов в детекторе,  $\sigma_f$  — эффективное нейтринное сечение на акт деления. Для расчета использовались данные из работы [9]. Число ожидаемых нейтринных событий при мощности реактора 90 МВт на расстоянии 7.07 м составляет  $0.67 \cdot 10^{-2} n_\nu / \text{с} \cdot \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — эффективность детектора к регистрации состоявшихся нейтринных событий по реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ .



**Рис. 6.** *a*) Результаты измерений скорости счета коррелированных событий для мгновенных сигналов в энергетическом окне 1.25–9 МэВ и для задержанных сигналов 1–12 МэВ с включенным и выключенным реактором, а также для двух вариантов активной защиты (АЗ). *б*) Результаты этих же измерений для мгновенных сигналов в энергетическом окне 3–9 МэВ и для задержанных сигналов 3–12 МэВ

Число зарегистрированных нейтринных событий определялось экспериментально как разность событий при включенном и выключенном реакторе. На рис. 5*a* представлено отношение зарегистрированных нейтринных событий к полному числу рассчитанных нейтринных событий ( $0.67 \cdot 10^{-2} n_\nu/\text{с}$ ) в зависимости от порогов мгновенных и задержанных сигналов для позиции детектора 7.07 м. Для сравнения на рис. 5*b* представлены результаты расчета по методу Монте-Карло, в котором разыгрывались только нейтринные события с известным нейтринным спектром. По результатам расчета методом Монте-Карло тоже сделан анализ зависимости эффективности детектора к нейтринным событиям от порогов мгновенных и задержанных сигналов. При нижнем пороге мгновенных и задержанных сигналов 1.5 МэВ эффективность регистрации реакторных антинейтрино составляет в эксперименте приблизительно 50 %, что не противоречит результатам расчета методом Монте-Карло (55 %) и экспериментальному определению эффективности регистрации нейтрона в эксперименте с калифорниевым источником [7, 8]. Обсуждаемая эффективность нейтринного детектора в основном определяется его эффек-

тивностью к регистрации нейтрона. Конечно, точность оценок является весьма приблизительной — на уровне  $\pm 15\%$ . Поскольку в данном эксперименте ставится задача проведения относительных измерений на разных расстояниях, данная точность для испытаний модели детектора считается приемлемой.

### 3.2. Активная защита детектора

Следующий этап исследований был связан с активной защитой детектора. Первая часть измерений была выполнена с первым вариантом активной защиты, где пластины сцинтиллятора имели толщину 3 см. Ее включение снижает число мюонных остановок в семь раз до уровня  $0.27 \mu/\text{с}$ , а число нейтронных захватов всего в два раза до уровня  $0.078 n/\text{с}$  (рис. 2). Следующим этапом подавления коррелированных нейтринных событий является ограничение энергии мгновенных сигналов от детектора уровнем 12 МэВ. Тогда скорость счета нейтринных событий уменьшается до  $2.7 \cdot 10^{-2} n/\text{с}$ . Оказалось, что целесообразно «запирать» детектор еще на 100 мкс после появления сигнала в детекторе с энергией более 12 МэВ или после сигнала в активной защите. Это

снизило скорость счета коррелированных нейтронных сигналов в детекторе до уровня  $1.8 \cdot 10^{-2} n/\text{с}$ . Наконец, ограничение мгновенных и задержанных сигналов диапазонами соответственно 3–9 МэВ и 3–12 МэВ снизило скорость нейтронных сигналов до уровня  $1.1 \cdot 10^{-2} n/\text{с}$ . Однако при таком ограничении уже заметно уменьшается число ожидаемых нейтринных событий.

Второй вариант активной защиты был выполнен из пластин толщиной 12 см. В этом случае удалось получить для точки, ближайшей к реактору, отношение эффект/фон приблизительно 0.23 вместо 0.12 (рис. 6). Значение этого отношения, равное 0.23, по-прежнему остается неудовлетворительным для измерения зависимости  $1/R^2$  с точностью несколько процентов, т. е. для поиска нейтринных осцилляций. Необходимо получить отношение равное единице, причем для дальней от реактора точки. Мы предполагаем, что оставшийся фон коррелированных событий связан в основном с быстрыми нейтронами космического фона. Быстрый нейtron даёт мгновенный сигнал через протон отдачи и задержанный сигнал при поглощении этого же нейтрона. Сейчас мы предпринимаем усилия по разделению сигналов по форме импульса, так как форма сигнала при регистрации протона отдачи и позитрона должна быть разной. В лабораторном эксперименте с объемом жидкого сцинтиллятора 75 л удалось разделить сигналы от гамма-квантов и быстрых нейтронов от Ри-Ве-источника нейтронов. Другая надежда на улучшение отношения сигнал/фон связана с увеличением эффективности детектора за счет увеличения объема детектора. Объем полномасштабного детектора планируется увеличить в четыре раза.

Наконец, были проведены исследования с внешней активной защитой (внешней по отношению к пассивной защите). На крыше пассивной защиты над детектором была установлена активная защита («зонтик») из пластин сцинтиллятора толщиной 12 см и общей площадью  $2 \times 3 \text{ м}^2$ . Учитывая, что площадь детектора составляет  $0.9 \times 0.9 \text{ м}^2$  такой «зонтик» должен перехватывать основной поток мюонов, идущих в область нейтринного детектора. Однако возрастание отношения эффект/фон составило всего лишь 15 %, а само отношение увеличилось до уровня 0.32. По-видимому, оставшийся коррелированный фон связан с быстрыми нейтронами, которые активная защита блокирует лишь частично. Таким образом, мы возлагаем основные надежды на использование метода разделения сигналов по форме импульса.

### 3.3. Измерение зависимости потока реакторных антинейтрино от расстояния до активной зоны реактора

На следующем этапе были реализованы измерения потока антинейтрино от реактора СМ-3 и получена его зависимость от расстояния. Результаты измерений коррелированных сигналов в зависимости от расстояния с включенным и выключенным реактором были представлены на рис. 6. Из разности этих данных были извлечены зависимости потока реакторных антинейтрино от расстояния до активной зоны реактора (рис. 7).

К сожалению, попытка увеличить статистику за счет более широкого энергетического интервала не улучшает ситуацию, так как в области малых энергий растет вклад коррелированных событий от космического фона.

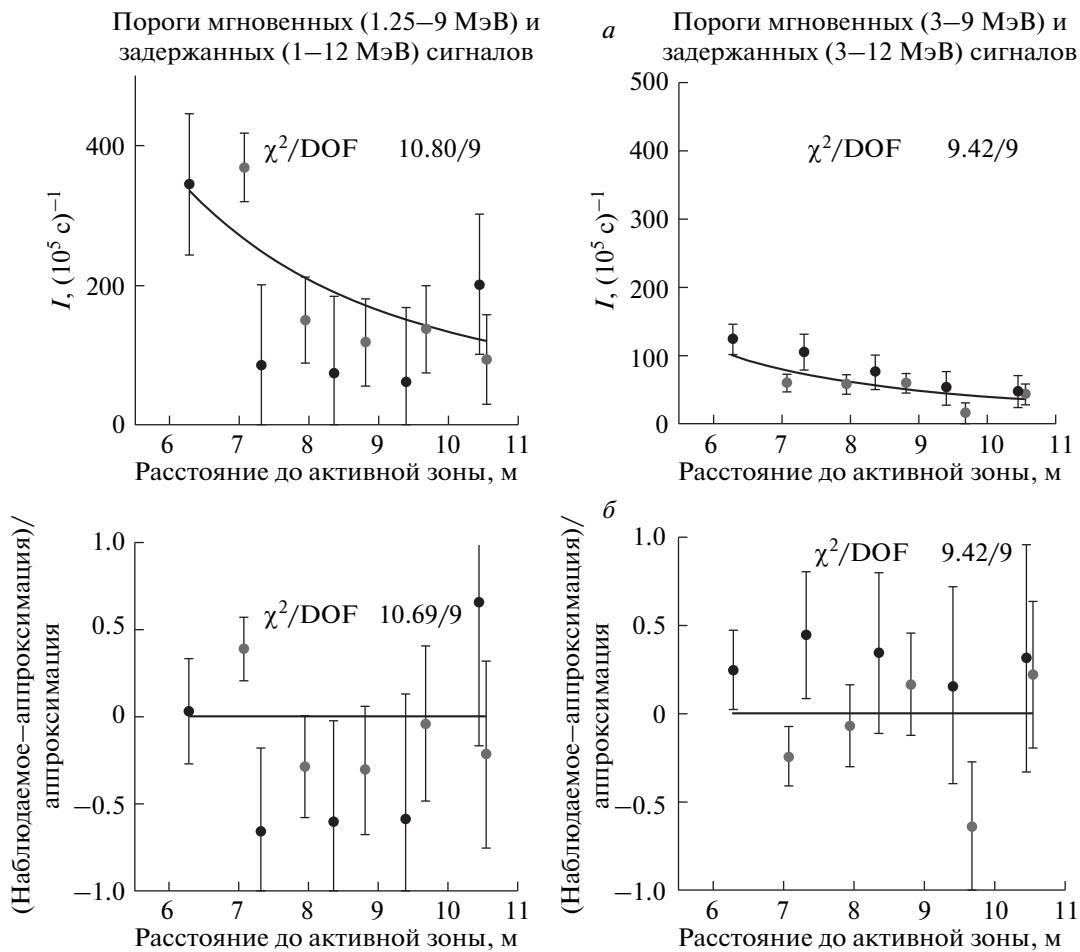
Чтобы проверить, что эффект разности связан в основном с антинейтрино от реактора СМ-3, были проведены дополнительные измерения в условиях, когда к стене реактора была добавлена еще одна кладка борированного полиэтилена толщиной 0.3 м, которая могла бы ослабить поток быстрых нейтронов от реактора в 3–4 раза. Результаты измерений с дополнительной стеной показали, что уменьшения разности (реактор включен–реактор выключен) не обнаружено в пределах статистической точности измерений 20 %.

## 4. ВЫВОДЫ

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Впервые сделана попытка измерения потока реакторных антинейтрино на малых расстояниях (6–11 м) от активной зоны реактора. Конечно, точность недостаточна для каких-либо заключений в плане постановки задачи о поиске стерильного нейтрино. Данная задача состояла только в исследовании возможности постановки такого эксперимента при уровне космического фона на поверхности Земли и при уровне фона, связанного с работой реактора. В этом эксперименте использовался прототип детектора малого объема.

2. Основную проблему данного эксперимента представляет коррелированный фон, связанный с космическим излучением. Космический фон зависит от расстояния от активной зоны реактора из-за структуры распределения бетонных масс здания. Кроме того, космический фон изменяется со временем из-за колебаний атмосферного давления и



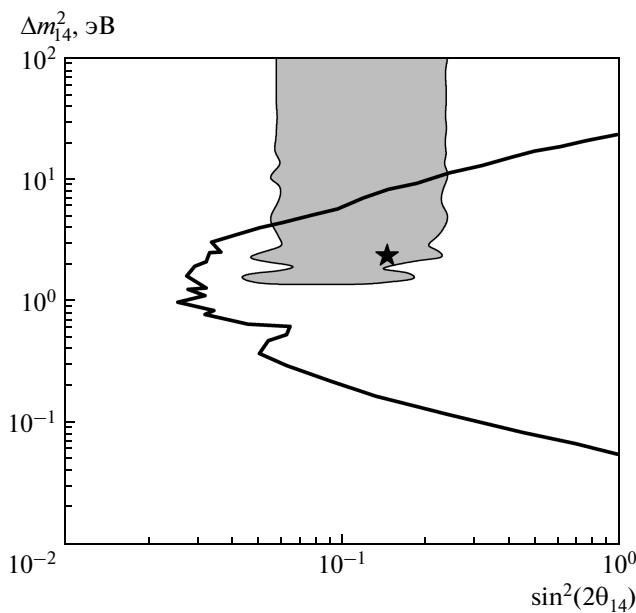
**Рис. 7.** а) Слева — зависимости разности скоростей счета коррелированных событий (реактор включен—реактор выключен) от расстояния до активной зоны реактора для мгновенных сигналов в энергетическом окне 1.25–9 МэВ и для задержанных сигналов 1–12 МэВ, справа — то же для энергетических интервалов 3–9 МэВ и 3–12 МэВ. б) Результаты обработки этих же данных на отклонение от закона  $1/R^2$ . Чёрные точки — первая версия АЗ, серые точки — последняя (текущая) версия АЗ

температуры нижних слоев атмосферы. Однако для борьбы с этими проблемами могут быть предложены следующие методы. Во-первых, может осуществляться мониторирование интенсивности космических лучей по высокогенергетической части спектра детектора, начиная с 10 МэВ. Во-вторых, измерения зависимости от расстояния следует проводить методом сканирования по расстоянию. Это позволяет значительно усреднить эффект временных вариаций космических лучей.

3. Использование активной защиты позволяет подавить коррелированный фон космического излучения только на 66 %. По-видимому, это часть космического фона, связанная с мюонами. Она может контролироваться активной защитой. Нейтронная ком-

понента практически не контролируется активной защитой, поэтому требуется использовать метод разделения сигналов от протонов отдачи и позитронов по форме импульса.

Проведенная работа дала достаточно информации для разработки полномасштабного детектора. В настоящий момент проект полномасштабного детектора полным объемом 3 м<sup>3</sup> разработан. Мы предполагаем, что реализация проекта и метода разделения сигналов от протонов отдачи и позитронов по форме импульса приблизит отношение эффект/фон к единице и значительно увеличит статистическую точность эксперимента. Это позволит перейти к исследованиям, связанным с поиском осцилляций на малых расстояниях.



**Рис. 8.** Сплошная линия — область чувствительности эксперимента Нейтрино-4 к параметрам осцилляций за 1 год набора статистики при 95 % CL. Затененная область — ограничение на параметры осцилляций  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2(2\theta_{14})$  при 95 % CL [1], \* — наиболее вероятные значения параметров

Для полномасштабного детектора объемом 3 м<sup>3</sup> область чувствительности эксперимента в координатах  $\Delta m_{14}^2$  и  $\sin^2(2\theta_{14})$  представлена на рис. 8 в предположении, что в эксперименте отношение

эффект/фон будет близко к единице. Таким образом, планируемый эксперимент в состоянии подтвердить или опровергнуть гипотезу о существовании стерильного нейтрино.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-22-03055-офи\_m).

## ЛИТЕРАТУРА

1. G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre et al., Phys. Rev. D **83**, 073006 (2011).
2. T. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot et al., Phys. Rev. C **83**, 054615 (2011).
3. А. П. Серебров, А. К. Фомин, М. С. Онегин и др., Препринт ПИЯФ 2892 (2012).
4. А. П. Серебров, В. Г. Зиновьев, А. К. Фомин и др., Препринт ПИЯФ 2900 (2012).
5. А. П. Серебров, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев и др., Письма в ЖТФ **39** (14), 25 (2013).
6. А. П. Серебров, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев и др., Письма в ЖТФ **40**(11), 8 (2014).
7. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов и др., Препринт ПИЯФ 2966 (2015).
8. A. P. Serebrov, V. G. Ivochkin, R. M. Samoylov et al., arXiv:1501.04740.
9. Y. Declais, Phys. Lett. B **338**, 383 (1994).