

## ГАРАНТИИ РЕАКТОРОВ НА БАЗЕ АНТИНЕЙТРИНО: ИССЛЕДОВАНИЕ КОНКРЕТНОГО СЛУЧАЯ ЯДЕРНОГО КРИЗИСА КНДР 1994 ГОДА

*Эрик Кристенсен, Патрик Хубер и Патрик Джаффке*

В данной статье представлен конкретный случай применения гарантий на базе антинейтрино к реальному сценарию – северокорейскому ядерному кризису 1994 года. Были определены пределы обнаружения частичной или полной разгрузки активной зоны в 1989 году, основанные на реальном применении гарантий МАГАТЭ, и было обнаружено, что два независимых метода могли с очень высокой степенью уверенности предоставить положительное доказательство существования второй активной зоны. Для обобщения этих результатов были представлены подробные оценки чувствительности для содержания плутония в различных типах реакторов, включая большинство типов реакторов для производства плутония, основанные на детальном моделировании реакторов. Основным выводом из данного исследования было то, что широкий класс реакторов с тепловой мощностью от 0,1 до 1 гигаватта может быть поставлен под гарантии, соответствующие целям МАГАТЭ в отношении количественной чувствительности и своевременности, при помощи детекторов антинейтрино, прилегающих к зданию реактора. Мониторинг антинейтрино от реактора не опирается на непрерывность знания и своевременно предоставляет информацию о запасах в активной зоне и уровне мощности. Необходимые системы регистрации пока еще не существуют, но ожидается, что они станут доступными в течение периода от двух до пяти лет.

Эрик Кристенсен, Патрик Хубер и Патрик Джаффке работают в Центре физики нейтрино Виргинского технического университета, Блэксбург, Виргиния, США.

Эрик Кристенсен работает также в университете штата Джорджия в Кеннесо, Кеннесо, Джорджия, США.

Почтовый адрес для корреспонденции: Patrick Huber, Center for Neutrino Physics, Department of Physics, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA.

Адрес электронной почты: rahuber@vt.edu

Статья получена 22 января 2014 года и принята к публикации 22 октября 2014 года.

### ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза о существовании нейтрино была высказана Вольфгангом Паули в 1930 году; эти частицы были экспериментально обнаружены Клайдом Коуэном и Фредом Рейнесом в 1956 году<sup>1</sup>. В эксперименте Коуэна-Рейнеса были успешно обнаружены антинейтрино, образующиеся в реакторе на площадке Саванна-Ривер. Точнее говоря, ядерный реактор – это источник электронных антинейтрино. Антинейтрино представляют собой электрически нейтральные частицы со спином, равным одной второй, с очень малой массой; они играют центральную роль в электрослабой стандартной модели физики элементарных частиц. Антинейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях и поэтому они обладают исключительно большой проникающей способностью. Не известно никаких практических способов защиты от нейтрино, или ослабления их потока. Антинейтрино в изобилии образуются при бета-распадах продуктов деления, что делает ядерные реакторы наиболее мощными искусственными источниками антинейтрино.

Базовая концепция мониторинга ядерных реакторов при помощи антинейтрино была предложена Боровым и Микаэляном в 1978 году<sup>2</sup>. В последнее время были предприняты усилия по оценке возможности точного определения содержания плутония в активной зоне реактора при помощи измерений антинейтрино<sup>3</sup>. Такая возможность, если она будет подтверждена, сможет позволить приступить к разработке гарантий для реакторов, основанных на обнаружении антинейтрино. Однако, широкое разнообразие предположений о возможностях детекторов антинейтрино и различные уровни статистического анализа в последних исследованиях привели к широкому разбросу результатов, что в свою очередь породило смешанные восприятия осуществимости гарантий на базе антинейтрино.

Гарантии на базе антинейтрино часто оценивались в стандартных сценариях, где уже успешно использо-

вались более обычные гарантии, что ограничивало *фактический* интерес к их разработке. С другой стороны, предложение сценариев, в которых стандартные методы не имели успеха, вызывало критику из-за того, что такие сценарии считались неестественными, нереалистичными, и надуманными для единственной цели, а именно демонстрации полезности антинейтрино. Тем не менее, имеются некоторые исторические прецеденты, в которых обычные гарантии либо не работали, либо не могли быть реализованы так, как следовало ожидать. Известным примером может служить первый северокорейский ядерный кризис 1994 года<sup>4</sup>. Поводом для кризиса послужил вопрос, сумела ли Народная демократическая республика Корея (КНДР или Северная Корея) произвести и выделить на своем ядерном реакторе в Йонбене гораздо большее количество плутония, чем она заявляла, или нет. Однако, КНДР ограничила объем информации, доступной Международному агентству по атомной энергии (МАГАТЭ) для предложения независимой оценки. Последующие испытания ядерного оружия в Северной Корее подтвердили существование военной ядерной программы.

После представления технических аспектов гарантий на базе антинейтрино в данной статье сначала показывается, что широкий класс реакторов с тепловой мощностью от 0,1 до 1 гигаватта может быть поставлен под гарантии, соответствующие целям МАГАТЭ в отношении количественной чувствительности и своевременности, при помощи детекторов антинейтрино, расположенных вне здания реактора. Затем в статье представляется, какими могли бы быть улучшения количественного понимания производства плутония в КНДР, и, в частности, оценки достоверности ее первоначальной декларации МАГАТЭ, если бы были реализованы гарантии на базе антинейтрино.

Исследование пришло к выводу того, что в рамках исторических ограничений и граничных условий ядерного кризиса КНДР 1994 года особые возможности гарантий на базе антинейтрино могли бы предоставить решающее преимущество над обычными методами в подтверждении отвлечения важных количеств плутония.

## МОНИТОРИНГ АНТИНЕЙТРИНО ОТ РЕАКТОРА

Нейтрино не образуются непосредственно в самом процессе деления ядер, а возникают в результате последующих бета-распадов продуктов деления с избытком нейтронов. Общее число излученных антинейтрино пропорционально общему количеству актов деления в реакторе. В среднем на каждый акт деления ядер приходится около шести антинейтрино, и в каждом делении ядра высвобождается энергия около 200 мегаэлектронвольт (МэВ). Следовательно, на каждый гига watt тепловой энергии образуется около  $10^{20}$  антинейтрино в секунду. Кроме того, распределение продуктов деления, и, поэтому, их бета-распадов, различно для разных делящихся изотопов. Таким образом, точная спектроскопия нейтрино должна будет предоставить информацию не только о полном количестве делений, но также и о распределении количества делений по различным содержащимся в активной зоне делящимся изотопам. Базовые концепции мониторинга мощности и определения содержания плутония в реакторе были экспериментально продемонстрированы в новаторской работе, выполненной группой из Курчатовского института под руководством Микаэляна<sup>5</sup>. Они разместили детектор антинейтрино объемом около  $1 \text{ м}^3$  на Ровненской атомной электростанции в Украине. При измерении мощности было получено согласие с результатами тепловых измерений в пределах 2,5 процента<sup>6</sup>; было продемонстрировано влияние изменения содержания плутония<sup>7</sup>, а позднее также были проведены исследования количественной точности<sup>8</sup>. Это позволяет *на месте* определять содержание плутония и уровень мощности в активной зоне реактора с расстояния в десятки метров<sup>9</sup>. Практическая осуществимость мониторинга реактора с использованием антинейтрино была также продемонстрировано на небольшом детекторе весом в тонну на атомной электростанции Сан Онофре в Пендлтоне, Калифорния, под названием SONGS<sup>10</sup>.

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АНТИНЕЙТРИНО

Начиная с открытия антинейтрино, "рабочей лошадкой" в экспериментах с антинейтрино от реактора стала реакция обратного бета-распада:



В реакции обратного бета-распада электронное антинейтрино взаимодействует с протоном, образуя нейтрон и позитрон; энергетический порог этого процесса равен  $(m_n - m_p + m_e)c^2 = 1,8 \text{ МэВ}$ . Позитрон аннигилирует, взаимодействуя с электроном и образуя 2 гамма-кванта с энергией по 511 кэВ. Это энерговыделение обычно регистрируется вместе с энергией позитрона  $E_e$  и поэтому энергия, наблюдаемая в детекторе, будет равна  $E_{\text{vis}} = E_e + 2 \times 511 \text{ кэВ}$ . Между энергией антинейтрино и энергией позитрона имеется однозначное соответствие

$E_v = E_e + 1,8 \text{ МэВ}$ . Поэтому измерение  $E_{vis}$  непосредственно преобразуется в измерение энергии антинейтрино  $E_v$ .

В реакции из уравнения (1) также рождается нейтрон, который замедляется в столкновениях с материалом детектора и в конце концов вступает в реакцию захвата нейтрона. Грамотный выбор ядер, захватывающих нейтроны, позволяет выделить эту сигнатуру. Обычным агентом захвата нейтронов может быть гадолиний (например, в эксперименте Дайа Бэй<sup>11</sup>) или литий (например, в эксперименте Буги<sup>12</sup>). Например, в случае гадолиния сигнатурой захвата нейтрона является испускание нескольких гамма-квантов с общей энергией 8 МэВ. Замедление и захват нейтрона требуют определенного времени, позволяющего осуществить метод задержанного совпадения: за первоначальным энерговыделением от позитрона через некоторое время появляется сигнал от захвата нейтрона. Это задержанное совпадение является ключевым фактором в выделении событий антинейтрино над фоном. Поперечное сечение захвата нейтрона в гадолинии значительно больше, чем у всех других материалов детекторов. Поэтому даже малые концентрации приведут к тому, что большая часть захватов нейтрона будет происходить именно на этих ядрах; аналогичные аргументы применимы и к литию.

Все сигнатуры приводят к ионизации, которая регистрируется органическим сцинтиллятором, либо в твердой, либо в жидкой форме. Органическая природа сцинтиллятора предоставляет свободные протоны для взаимодействия в уравнении (1). Недавно были проведены три эксперимента, направленные на применение в фундаментальной физике жидких сцинтилляторов с добавкой гадолиния в большом объеме в несколько десятков тонн; они прошли без проблем с безопасностью и показали прекрасную долговременную стабильность<sup>13</sup>. В данной статье рассматривается детектор с массой в 5 т на базе органического сцинтиллятора, что соответствует числу протонов в мишени, равному  $4,3 \cdot 10^{29}$ . Эффективность реального детектора не будет равна 100 процентам, и для получения того же количества событий потребуются детектор большего размера<sup>14</sup>. Были построены многочисленные детекторы с эффективностью более 50 процентов, и, следовательно, даже реалистичный детектор, регистрирующий такое же количество событий, должен будет иметь массу меньше 10 т. В стандартный 20-футовый транспортный контейнер для смешанных перевозок с чистой грузоподъемностью 28,2 тонны легко поместится 10-тонный детектор антинейтрино вместе с вспомогательными системами. Спектр антинейтрино измеряется в диапазоне энергий от 1,8 МэВ до 8 МэВ в интервалах шириной 0,2 МэВ, что при энергии 4 МэВ приблизительно соответствует  $10\%/E^{1/2}$ , что аналогично разрешению в последних экспериментах<sup>15</sup>. Как показали испытания, вдвое худшее разрешение приведет к практически идентичным результатам. Для поперечного сечения обратного бета-распада использовались результаты Вогела и Бикомы<sup>16</sup>, исправленные на время жизни нейтрона в 878,5 с<sup>17</sup>. Для всех экспериментах на реакторах расстояние удаления равнялось 20 м, что позволяет разместить детектор за пределами здания реактора. Такой детектор на таком расстоянии обычно будет регистрировать около 5 000 событий в год от реактора, работающего с тепловой мощностью 1 МВт в течение всего года.

В настоящее время не существует никаких систем детекторов со всеми требуемыми характеристиками, и, в особенности, следует продемонстрировать работу на поверхности с достаточно высокой эффективностью сигнала (смотрите также раздел о влиянии фона). Значительных успехов в этом направлении недавно достигла японская группа, которая сумела зарегистрировать антинейтрино от реактора детектором в кузове фургона<sup>18</sup>. Учитывая значительные международные усилия в области обнаружения антинейтрино от реактора на малых расстояниях для исследования аномалии реакторных нейтрино (смотрите следующий раздел по моделям потока от реактора), вероятно, что первый прототип, имеющий все требуемые свойства, станет доступным в течение 12 – 18 месяцев. Стоимость таких прототипов будет составлять около миллиона долларов, но системы второго поколения будут обладать значительным потенциалом для улучшения отношения стоимости к эффективности.

## МОДЕЛИ ПОТОКА ОТ РЕАКТОРОВ

Более 99 процентов мощности реакторов с урановым топливным циклом производится в процессе деления четырех делящихся изотопов: урана-235, плутония-239, урана-238 и плутония-241. Реактор со свежим топливом начинает только с деления изотопов урана, а плутоний производится при захвате нейтронов в уране-238 по мере увеличения глубины выгорания. Общий поток нейтрино от реактора  $\varphi$  в единицах антинейтрино в секунду и на 1 МэВ может быть записан как:

$$\varphi(E) = \sum_I f_I S_I(E) \quad (2)$$

где  $f_I$  – число делений в секунду (скорость деления) в изотопе  $I$  и  $S_I(E)$  – выход антинейтрино для изотопа  $I$  в единицах антинейтрино в секунду на 1 МэВ. Тепловая мощность реактора также задается в терминах скоростей деления:

$$P_{th} = \sum_I f_I p_I \quad (3)$$

где  $p_I$  – выход тепловой энергии в одном делении ядра изотопа  $I$ ; значения  $p_I$  берутся из работы Копейкина<sup>19</sup>. Для разделения вкладов четырех изотопов необходимо рассчитать выходы антинейтрино  $S_I$ . Значения выходов задаются спектрами антинейтрино  $\nu_k(E)$  от каждого продукта деления  $k$  и совокупного выхода каждого продукта  $Y_k$ :

$$S_I(E) = \sum_k Y_k^I \nu_k(E) \quad (4)$$

где в сумме по  $k$  обычно учитываются около 800 изотопов. На практике спектр антинейтрино от заданного продукта деления неизвестен; доступна лишь информация, относящаяся к бета-спектру, причем часто она недостаточна. Из-за особенностей ядерной физики непосредственный расчет выходов нейтрино  $S_I$  суммированием всех индивидуальных спектров антинейтрино будет неточным<sup>20</sup>.

Более точный метод основан на измерении интегрального бета-спектра от всех продуктов деления<sup>21</sup>; впоследствии из этих измерений можно будет реконструировать спектр антинейтрино<sup>22</sup>. Этот метод меньше зависит от ядерных данных, но он также не свободен от неопределенностей из-за влияния ядерной структуры<sup>23</sup>.

Сравнение предсказаний частоты событий для различных моделей потока показывает, что как простая модель, основанная на прямом суммировании спектров антинейтрино, и более сложные вычисления, подобные работе Фаллота и др.<sup>24</sup>, а также метод обратного преобразования, дают очень похожие результаты в терминах скоростей счета и средних энергий при нормировке на уран-235<sup>25</sup>. Другими словами, различие в выходе антинейтрино и средней энергией между делящимися изотопами согласованно предсказывается различными моделями потока.

На практике текущие ошибки в любой модели потока значительны, и для уменьшения влияния этих неопределенностей, в особенности ввиду аномалии реакторных антинейтрино<sup>26</sup>, требуются провести ряд калибровочных измерений на реакторах с известным содержанием делящихся элементов. Было получено теоретическое доказательство концепции таких калибровок<sup>27</sup>. Со стороны эксперимента коллаборация Дайа Бэй продемонстрировала возможность кросс-калибровки набора из восьми детекторов антинейтрино с точностью лучше 0,5 процентов<sup>28</sup>.

## РАСЧЕТЫ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ

Соотношение между количествами делений в секунду и запасами массы требует более детального подхода к физике реактора. Если поток нейтронов постоянен во времени и пространстве, то скорости делений  $f_I$  и масса заданного делящегося изотопа  $m_I$  связаны простым линейным соотношением:

$$f_I = \phi_n \sigma_I m_I \quad (5)$$

где  $\sigma_I$  – усредненное по энергии поперечное сечение рассеяния и  $\phi_n$  – поток нейтронов. При эволюции активной зоны все множители в правой части уравнения (5) будут изменяться. Из-за эффектов выгорания будет изменяться масса  $m_I$ , а поток нейтронов обычно будет перестраиваться из-за изменения реактивности для поддержания постоянной мощности. Накопление продуктов деления будет изменять поглощение нейтронов, что, в свою очередь, изменит энергетический спектр нейтронов; так же будет изменяться и усредненное поперечное сечение  $\sigma_I$ . Мы выполняем расчеты эволюции или выгорания для нескольких типов реакторов с помощью пакета программ SCALE<sup>29</sup>. Для дальнейшего обсуждения полезно ввести доли деления  $F_I$ , которые определяются как:

$$F_I = \frac{f_I}{\sum_I f_I} \quad \sum_I F_I = 1 \quad (6)$$

Преимущество такого определения заключается в том, что проблему можно будет перефразировать независимо от мощности реактора. Для иллюстрации на левой части рисунка 1 показана временная эволюция  $f$  для реактора с графитовым замедлителем и топливом из природного урана, где доли деления показаны как функции от глубины выгорания. В таком типе реактора величина  $F_{Pu241}$  очень близка к нулю и поэтому она не видна на этом рисунке. Доля деления урана-238 остается постоянной, поскольку количество урана-238 в реакторе очень мало изменяется со временем. Имеется очевидная антикорреляция между долями деления урана-235 и плутония-239. Как показано на правой части рисунка 1, антикорреляция является почти точной. Глубина выгорания характеризует количество делений, происшедших в единице массы топлива, или, другими словами, количество извлеченной энергии; единицей измерения глубины выгорания является МВт-сутки/т. В пренебрежении радиоактивным распадом изотопный состав образцов с одной и той же глубиной выгорания будет одинаковым, поскольку полное число происшедших делений будет тем же самым. Подробности истории изменения мощности и выключений оказывают лишь малое влияние на реактивность и доли деления. Для цели моделирования требуется обоснованно точная модель изменения мощности реактора, которая, в свою очередь, служит входной информацией для подробного расчета физики реактора. Возможность предсказания излучения антинейтрино во времени будет опираться только на модель глубины выгорания как функции времени. И, наоборот, точное измерение излучения нейтрино позволит сделать выводы о временной зависимости глубины выгорания.

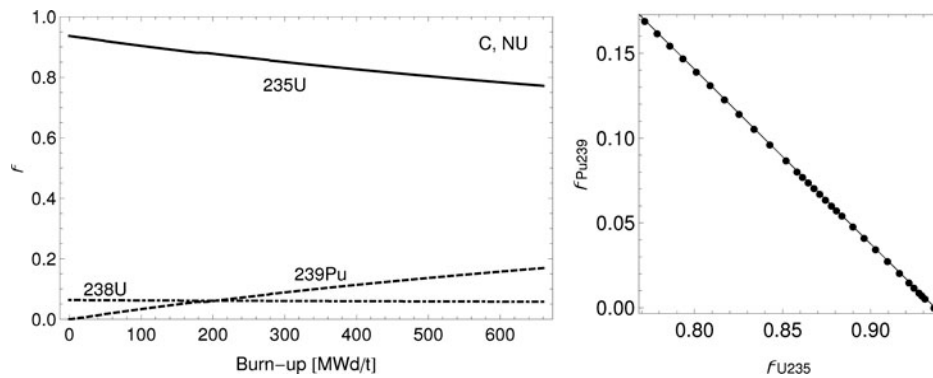


Рисунок 1. На левой части рисунка показана эволюция долей деления (по вертикальной оси) в реакторе с графитовым замедлителем и топливом из природного урана в зависимости от глубины выгорания (по горизонтальной оси; в МВт-сутки/т). На правой части рисунка показана антикорреляция долей деления урана-235 (по горизонтальной оси) и плутония-239 (по вертикальной оси).

Эти расчеты глубины выгорания подтверждают, что отношение между долями деления и запасами массы, заданное уравнением (5), остается линейным, и что значение  $\phi_{n, \sigma_{Pu241}}$  остается почти постоянным.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПЛУТОНИЯ

Разница в выходах антинейтрино может быть использована для определения вкладов каждого из делящихся изотопов. Скорость счета событий в каждом интервале  $n_i$  задается как:

$$n_i = N \sum_I f_I \int_{E_i - \Delta E/2}^{E_i + \Delta E/2} dE \sigma(E) S_I(E) \quad (7)$$

где  $E_i$  – центральная энергия интервала  $i$ ,  $\Delta E$  – ширина интервала и  $\sigma(E)$  – поперечное сечение обратного бета-распада.  $N$  – общая константа нормализации, устанавливаемая количеством свободных протонов и эффективностью регистрации. Для вычисления скорости счета событий необходимо указать четыре скорости деления для четырех изотопов:  $f = (f_{U235}, f_{U238}, f_{Pu239}, f_{Pu241})$ . Истинные или входные значения для расчета обозначаются надстрочным индексом 0, то есть истинные числа делений в секунду обозначаются как  $f^0$ , и, аналогично  $n_i$ , рассчитанные для истинных значений  $f^0$ , обозначаются как  $n_i^0$ . Функция  $\chi^2$  определяется как:

$$\chi^2(f) := \sum_i \frac{(n_i(f) - n_i^0)^2}{n_i^0} \quad (8)$$

Для  $f = f^0$  эта функция  $\chi^2$  должна быть равна нулю. Допустимая область для  $f$  определяется условием:

$$\chi^2(f) \leq \chi_c^2 \quad (9)$$

где критическое значение  $\chi_c^2$  определяется из распределения вероятности  $\chi^2$ , в данном случае для четырех степеней свободы. Если интерес представляет только общее количество делений в плутонии, задаваемое как  $f_{Pu} = f_{Pu239} + f_{Pu241}$ , то надо будет использовать следующую маргинализированную функцию:

$$\bar{\chi}^2(f_{Pu}) = \min_{f_{U235}, f_{U238}, \kappa} \chi^2(f_{U235}, f_{U238}, (1-\kappa)f_{Pu}, \kappa f_{Pu}) \quad (10)$$

и с одним параметром  $f_{Pu}$  число степеней свободы уменьшится до одной. Аналогично, соответствующую функцию от одного параметра можно будет определить для измерения мощности реактора.

Значение  $f_{Pu}$  будет пропорционально массе плутония в реакторе  $m_{Pu}$ :

$$\gamma = \frac{m_{Pu}}{f_{Pu}} \quad (11)$$

где  $\gamma$  – константа пропорциональности. Поэтому измерение  $f_{Pu}$  транслируется в измерение  $m_{Pu}$ . Константа  $\gamma$ , в свою очередь, зависит от подробностей физики реактора, так же как и от мгновенной тепловой мощности реактора; отметим, что в соответствии с уравнением (5)  $\gamma = 1/(\phi_n \sigma_{Pu})$  и поэтому обратно пропорциональна плотности потока нейтронов  $\phi_n$ . Определение  $m_{Pu}$  и его связь с  $\gamma$  ясно иллюстрируются рисунком 2, на котором показана точность определения  $m_{Pu}$  для различных типов реакторов в зависимости от тепловой мощности. Этот рисунок базируется на полном расчете глубины выгорания в реакторе, где "С, NU" соответствует реактору с графитовым замедлителем, работающем на природном уране, и точка на этой линии соответствует реактору с электрической мощностью в 5 МВт в КНДР. "H<sub>2</sub>O, HEU" и "H<sub>2</sub>O, HEU + NU" соответствуют другому северокорейскому реактору ИРТ, соответственно только с запальной зоной, и с запальной зоной и мишенями. Вариант "H<sub>2</sub>O, LEU" рассчитывается для типичного реактора с обычной водой под давлением. История мощности была взята для одного такого реактора с полной загрузкой топлива, обогащенного до 3,7 процента, в 72,4 тонны<sup>30</sup>. Случай "D<sub>2</sub>O, NU" описывает реактор с тяжеловодным замедлителем, работающий на природном уране, моделируемый по конструкции CANDU с загрузкой топлива с природным ураном в 8,6 тонны, работающего на тепловой мощности 40 МВт. Точка в 40 МВт(тепл.) на этой линии представляет иранский реактор в городе Арак<sup>31</sup>, и точность определения должна быть на уровне 2,7 кг за 90 суток. Горизонтальная линия соответствует чувствительности в 8 кг плутония на уровне достоверности в 90 процентов (или 5 кг на уровне достоверности в 68 процентов) в течение 90 суток.

Для каждого из различных типов реакторов точность измерения может быть описана следующим простым соотношением:

$$\delta m_{Pu} = 1.9 \text{kg} \left( \frac{\gamma}{10^{-16} \text{kg} \cdot \text{s}} \right) \left( \frac{L}{\text{m}} \right) \left( \frac{P_{th}}{\text{MW}} \right)^{1/2} \left( \frac{\text{tonnes}}{M} \right)^{1/2} \left( \frac{\text{days}}{t} \right)^{1/2} \quad (12)$$

где  $L$  – расстояние до детектора антинейтрино,  $P_{th}$  – средняя тепловая мощность реактора,  $M$  – масса детектора в тоннах (в предположении  $8,65 \cdot 10^{28}$  протона на тонну), и  $t$  – продолжительность периода накопления данных. В таблице 1 перечислены соответствующие значения  $\gamma$  и при использовании этих значений уравнение (12) воспроизводит результаты полных расчетов с точностью до нескольких процентов.

Таблица 1. Значения  $\gamma$  для нескольких типов реакторов.

Тип реактора	С, NU	H <sub>2</sub> O, HEU	H <sub>2</sub> O, HEU + NU	H <sub>2</sub> O, LEU	D <sub>2</sub> O, NU
$\gamma (10^{-16} \text{ кг} \cdot \text{с})$	2,9	0,064	0,34	0,30	0,11

Для большей части условий эксплуатации реактора изменение  $\gamma$  очень мало и только очень слабо зависит от глубины выгорания и истории реактора (на уровне нескольких процентов).

Задача МАГАТЭ в гарантиях для плутония в облученном топливе состоит в обнаружении отвлечения одного значительного количества, соответствующего 8 кг плутония, в течение 90 дней на уровне достоверности 90 процентов, согласно справочнику по гарантиям МАГАТЭ<sup>32</sup>. Важно отметить, что "обнаружение отвлечения"

не только требует измерения того, сколько плутония находится в реакторе, но и понимания того, как много плутония должно находиться в реакторе. Это ожидание, например, может появиться в результате предыдущей инспекции, или из расчетов, основанных на заявленных или измеренных параметрах. Здесь делается предположение того, что ожидание того, сколько плутония должно находиться в реакторе, было определено, и что ошибка в этом ожидании мала по сравнению с ошибками измерения антинейтрино. В таком предположении точность измерения антинейтрино и предел обнаружения отвлечения будут одними и теми же, и поэтому оба этих термина будут в дальнейшем использоваться как синонимы.

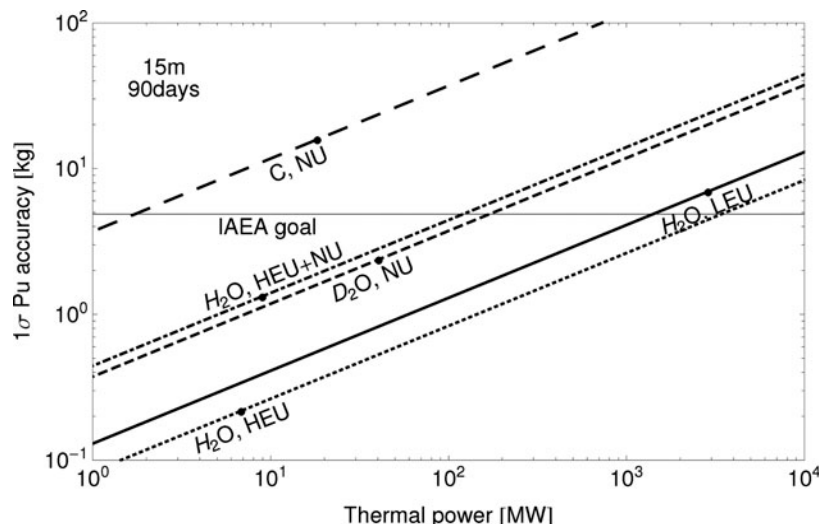


Рисунок 2. Абсолютная точность определения содержания плутония, основанного на измерении спектра антинейтрино (по вертикальной оси, в кг) в зависимости от проектной тепловой мощности реактора (по горизонтальной оси, в МВт). Различные линии соответствуют различным типам реакторов, как это показано метками: первая часть метки обозначает тип замедлителя, а вторая часть обозначает тип топлива, природный уран (NU), низкообогащенный уран (LEU), и высокообогащенный уран (HEU). Для этого рисунка предполагался детектор в 5т, расположенный в 15 м от активной зоны, с 90-дневным периодом накопления данных. Горизонтальная линия, обозначенная как "Задача МАГАТЭ", показывает точность, соответствующую обнаружению 8 кг плутония на уровне достоверности 90 процентов, что эквивалентно 5 кг на уровне  $1\sigma$ .

Для реакторов с тепловой мощностью, превышающей 1 ГВт(тепл.), которые составляют большинство всех реакторов, используемых во всем мире для производства электроэнергии, данный подход к гарантиям столкнется с трудностями при выполнении задач МАГАТЭ. С другой стороны, гарантии на базе антинейтрино непосредственно применимы к исследовательским реакторам, небольшим модульным реакторам, и реакторам для производства плутония.

Доли деления, и, следовательно, скорости деления, *не* являются независимыми друг от друга, а связаны физикой реактора (смотрите правую часть рисунка 1). Это позволяет перефразировать проблему подгонки в терминах одной независимой величины, глубины выгорания. Результатом анализа станет значение глубины выгорания и некоторые пределы ошибок, и поскольку модель реактора также предоставляет все запасы массы в зависимости от глубины выгорания, измерение глубины выгорания транслируется в измерение запасов в активной зоне, а ошибки могут быть определены стандартным распространением ошибок. В случае реактора с графитовым замедлителем это сокращает ошибку в определении массы плутония примерно на 50 процентов, смотрите раздел по реактору с электрической мощностью 5 Мвт(эл.) в Йонбене. В тех случаях, когда имеется надежная проектная информация и известны ключевые эксплуатационные параметры, модель выгорания будет представлять запасы в активной зоне с точностью в диапазоне от 5 до 10 процентов, что внесет небольшой дополнительный вклад в общую ошибку. Если проектные и эксплуатационные параметры реактора неизвестны, то надо будет произвести подгонку к долям деления и мощности.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СЕВЕРОКОРЕЙСКОГО КРИЗИСА 1994 ГОДА

26 февраля 1993 года МАГАТЭ потребовало проведения специальных инспекций для разрешения расхождений, выявленных в ходе первых гарантийных инспекций, проведенных в 1992 году. Предметом спора было количество плутония, выделенного в КНДР из отработавшего ядерного топлива. Северная Корея заяв-

вила, что она произвела около 90 г<sup>33</sup>, но данные МАГАТЭ не исключали возможности производства значительно большего количества, возможно, вплоть до 14 кг<sup>34</sup>. 12 марта 1993 года КНДР объявила о своем намерении выйти из Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) 12 июня 1993 года после угрозы проведения специальных инспекций, но 11 июня 1993 года Соединенные Штаты убедили Северную Корею не делать этого.

Северная Корея запустила свой реактор в Йонбене с электрической мощностью 5 МВт(эл.) в 1986 году. В 1989 году реактор был остановлен на 70 суток, предоставив возможность выгрузить из активной зоны от 50 до 100 процентов отработавшего топлива. В своей первоначальной декларации МАГАТЭ в 1992 году Северная Корея указала, что она провела в 1990 году разовую кампанию переработки, в ходе которой было выделено 90 г плутония из ограниченного количества поврежденных топливных стержней, извлеченных во время выключения реактора в 1989 году.

Однако, результаты сбора образцов окружающей среды, проведенные МАГАТЭ в ходе первой гарантийной инспекции, указали на по крайней мере три кампании переработки в 1989, 1990 и 1991 годах<sup>35</sup>, что в свою очередь позволяло предположить, что значительная часть отработавшего топлива была извлечена в 1989 году. В результате КНДР могла получить большее количество выделенного плутония, возможно достаточное для того, чтобы изготовить одну или две атомные бомбы. В частности, приоритетом для МАГАТЭ был поиск и сбора образцов в отходах от переработки, что в конечном счете привело к требованию проведения специальных инспекций<sup>36</sup>. Дипломатический обмен между МАГАТЭ и КНДР тянулся медленно, параллельно с переговорами с Соединенными Штатами; последние в конце концов привели к *Согласованным рамкам*. В апреле 1994 года Северная Корея усугубила проблему, начав разгружать отработавшее топливо из активной зоны реактора. Анализ гамма-излучения отработавшего топлива, взятого из известных позиций активной зоны реактора позволил бы разрешить вопрос о том, как много отработавшего топлива было выгружено в 1989 году. Тем не менее, разгрузка производилась очень быстро, и вся информация о первоначальном положении каждого топливного элемента в реакторе была потеряна. В результате МАГАТЭ не смогла получить решающего доказательства и 2 июня 1992 года Ганс Бликс, в то время бывший директором агентства, заявил, что возможность разрешения вопроса была "серьезно подорвана"<sup>37</sup>. Топливо, разгруженное в 1994 году, было размещено в хранилище, и находилось под наблюдением МАГАТЭ до 2003 года. Кризис 1994 года был разрешен так называемыми *Согласованными рамками*, согласно которым КНДР прекращала производство плутония и переработку топлива в обмен на обещание бесплатно получить два реактора с обычной водой под давлением<sup>38</sup>. *Согласованные рамки* перестали действовать в 2003 году, когда КНДР заявила, что она выходит из ДНЯО, и в конечном счете в 2006 году КНДР провела свое первое ядерное испытание.

Подробный анализ истории ядерной программы Северной Кореи был проведен Хекером<sup>39</sup>. В КНДР есть два реактора, ИРТ, поставленный Советским Союзом исследовательский реактор с тепловой мощностью около 8 МВт(тепл.), и реактор 5 МВт(эл.) с графитовым замедлителем и тепловой мощностью приблизительно 20 МВт(тепл.) и электрической мощностью 5 МВт(эл.), из-за которой он получил свое название. Имеется также Радиохимическая лаборатория с перерабатывающей установкой, позволяющей выделять плутоний из отработавшего топлива реактора 5 МВт(эл.). Эти установки и их относительное расположение показаны на рисунке 3 вместе с контурами скорости счета обратного бета-распада.

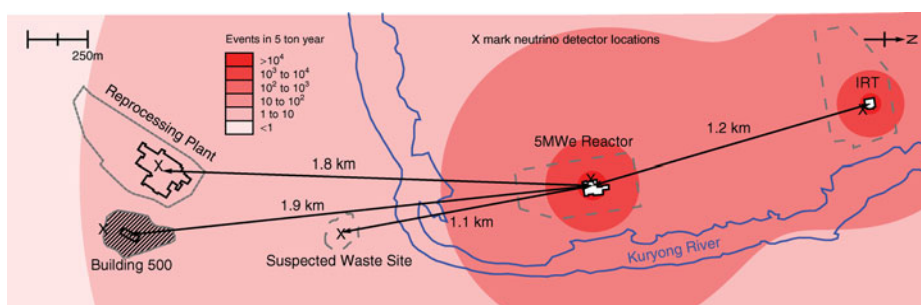


Рисунок 3. Географическая карта ядерного предприятия в Йонбене. Контуры показывают ожидаемые скорости счета событий обратного бета-распада в детекторе массой 5 т за год. Крестики показывают расположение различных детекторов антинейтрино, рассматриваемых в настоящей статье. Спутниковое изображение, на котором базируется эта карта, было получено 16 мая 2013 года спутником GeoEye-1. Надписи на рисунке (слева направо): 1 – перерабатывающий завод; 2 – строение 500; 3 – события в 5 тоннах за год; 4 – предполагаемое хранилище отходов; 5 – крестики отмечают расположение детекторов антинейтрино; 6 – реактор МВт(эл.); 7 – река Курйонг; 8 – реактор ИРТ. © Digital Globe.



Реактор ИРТ был поставлен из Советского Союза в 1960-х годах<sup>40</sup>. В этом реакторе использовался замедлитель из обычной воды и топливо с ВОУ с обогащением от 10 до 80 процентов<sup>41</sup>. Советский Союз также поставлял топливо с ВОУ до 1990-х годов. Номинальная тепловая мощность этого реактора составляла 8 МВт(тепл.).

Серьезная работа по топливному циклу началась в 1980-х годах; планировалось построить и эксплуатировать три реактора с газовым охлаждением, графитовым замедлителем и топливом с природным ураном. Проект реактора следовал проекту британского реактора "Магнокс", поскольку этот тип реактора был хорошо приспособлен к внутренним промышленным возможностям Северной Кореи. В то же время реакторы "Магнокс" первоначально проектировались как установки двойного назначения для производства как электроэнергии, так и плутония оружейного качества.

Количество произведенного в реакторе плутония можно оценить, если известен интегральный поток нейтронов, пропорциональный полной произведенной энергии, или, эквивалентно, если доступна *полная* история мощности реактора. Для получения плутония в пригодной форме следует остановить реактор<sup>42</sup>, извлечь облученные топливные стержни и в Радиохимической лаборатории химически выделить плутоний из отработавшего топлива. Расположение различных установок показано на рисунке 3.

Временная эволюция глубины выгорания при электрической мощности в 5 МВт(эл.) показана на рисунке 4, адаптированном из рисунка в книге "Ядерный ребус"<sup>43</sup>. Сплошная кривая основана на заявлениях КНДР, и, следовательно, на предположении, что в 1989 году не происходило никакой крупной выгрузки. Штриховая кривая определена в предположении полной замены топлива на свежее во всей активной зоне в 1989 году и одинаковой конечной глубины выгорания в обоих вариантах. Эти значения могут быть правдоподобно преобразованы в тепловую мощность реактора с использованием того факта, что в реакторе находится приблизительно 50 тонн урана<sup>44</sup>. Затем уровни мощности станут входными параметрами для детального расчета изотопного состава и скоростей деления.

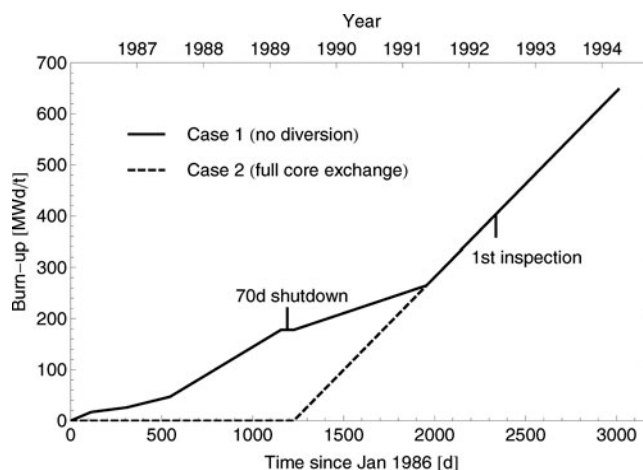


Рисунок 4. Глубина выгорания топлива в реакторе 5 МВт(эл.) (по вертикальной оси, в МВт-сутки/т) в зависимости от времени, измеряемого в сутках с 1 января 1986 года. Сплошная кривая основана на заявлениях КНДР, то есть без крупной перезагрузки топлива в 1989 году. Штриховая кривая определена в предположении полной замены топлива на свежее во всей активной зоне в 1989 году. из работы Олбрайта и О'Нила<sup>41</sup>.

### ГАРАНТИИ НА БАЗЕ АНТИНЕЙТРИНО В КРИЗИСЕ 1994 ГОДА В КНДР

После начальных расхождений, проявившихся в 1992 году, центральным вопросом для международного сообщества стало то, как много плутония выделила КНДР. Нижний предел этого количества определяется предположением того, что первоначальное представление КНДР в МАГАТЭ было количественно верным, то есть, было выделено всего лишь 90 г плутония. Верхний предел количества выделенного плутония определяется предположением того, что в 1989 году была выгружена вся активная зона с глубиной выгорания примерно 200 МВт-сутки/т, содержащая 8,8 кг плутония, и что впоследствии вся активная зона была переработана. Северокорейские ученые могли в течение длительного времени производить дополнительный плутоний, облучая мишени из природного урана в реакторе ИРТ. Ограниченная доступность топлива вместе с эффективными гарантиями МАГАТЭ позволяют предположить, что на реакторе ИРТ могло быть произведено не более, чем 1 кг плутония<sup>45</sup>; далее будет показано, что ограничения по антинейтрину будут такими же.

В реакторе 5 МВт(эл.) во время первой инспекции МАГАТЭ в 1992 году глубина выгорания и мощность реактора для обеих экстремальных случаях были одинаковыми (смотрите рисунок 4). Поэтому данный анализ будет включать гипотетический сценарий, в котором гарантии на базе антинейтрино были применены до и после выключения в 1989 году<sup>46</sup>. Специфическая уникальная возможность, представляемая в данном случае гарантиями на базе антинейтрино, возникает из возможности *независимого* измерения истории мощности и глубины выгорания, и любое расхождение будет указывать на отвлечение топлива.

В процессе переработки "ПУРЕКС" продукты деления остаются в водной фазе и поэтому закончат свой путь в отходах. Некоторые из этих продуктов деления порождают антинейтрино с энергией выше порога обратного бета-распада даже после истечения значительного периода времени. Они называются долгоживущими изотопами; в частности, период полураспада стронция-90 равен 28,9 года, рутения-106 – 372 дня и церия-144 – 285 дней. Эти три изотопа имеют большие выходы при делении и они являются точными индикаторами глубины выгорания. Обнаружение нейтрино от долгоживущих изотопов является прямым методом для обнаружения отходов переработки или отработавшего топлива, и, в принципе, также позволяют получить оценку количества выделенного плутония. Учитывая высокую проникающую способность антинейтрино, этот метод в равной степени применим к захороненным отходам.

И, наконец, антинейтрино распространяются на любые расстояния, и поэтому детектор антинейтрино, размещенный для гарантий реактора ИРТ, будет также чувствительным к нейтрино от реактора 5 МВт(эл.), особенно в то время, когда реактор ИРТ будет выключен. Этот сигнал позволит провести измерения мощности, которые могут различить два случая, показанные на рисунке 4.

### Реактор 5 МВт(эл.) в Йонбене

Чувствительности по отношению к мощности, глубине выгорания и содержанию плутония определялись на основании заявленной истории мощности. Эта история показана сплошными кривыми на различных рисунках в данном разделе. Сравнения делаются с гипотетической необъявленной заменой активной зоны на свежую активную зону реактора в течение 70-дневного периода выключения, показанными как штриховые кривые. Трудность в определении различия между двумя кривыми состоит в том факте, что после 1992 года мощность и глубина выгорания одинаковы для обеих сценариев. После первой инспекции все скорости делений для четырех первичных делящихся изотопов идентичны для сценариев с отвлечением или без него. Для последующего анализа использовался стандартный пятитонный детектор на расстоянии 20 м от реактора, что для периода накопления данных в один год соответствует примерно 95 000 событиям.

Сначала рассмотрим расчет чувствительности к мощности. Анализ производится при помощи следующей  $\chi^2$ -функции:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{1}{n_i^0} \left[ \left( NP_{th} \sum_l F_l S_{l,i} \right) - n_i^0 \right]^2 \quad (13)$$

где  $F_l$  – доля деления для изотопа  $l$ ,  $n_i^0$  – измеренное число событий антинейтрино в  $i$ -ом интервале энергий, и  $S_{l,i}$  – выход антинейтрино в  $i$ -ом интервале энергий для  $l$ -го изотопа.  $P_{th}$  – это тепловая мощность и  $N$  – константа нормализации. Кроме того, доли деления  $F_l$  связаны ограничением нормировки согласно уравнению (6).

В этом анализе предполагается точное знание расстояния от реактора до детектора; каждый из них представляется точкой. Любая неопределенность в геометрическом аспекте будет непосредственно связанной с неопределенностью константы нормализации, и, следовательно, с неопределенностью тепловой мощности  $P_{th}$ . В пренебрежении этим потенциальным источником систематической ошибки может быть достигнута точность измерения мощности, достигающая двух процентов.

Аналогичный анализ может быть проведен для глубины выгорания  $BU$  с помощью уравнения (13). Теперь  $P_{th}$  будет свободным параметром в подгонке и доли деления  $F_l$  станут теперь функциями от глубины выгорания, определяемыми моделированием в активной зоне реактора. Результаты этого анализа показаны на рисунке 5. Глубина выгорания в течение истории реактора будет иметь ошибку в приблизительно 100 МВт·сутки/т. Количество плутония в ядерном реакторе будет тесно связано с глубиной выгорания. Этот анализ снова будет проводиться с помощью уравнения (13). В это время  $P_{th}$ , так же как и  $F_{U238}$  и  $F_{U235}$ , будут свободными параметрами вместе с относительным вкладом двух скоростей деления плутония  $k$ , и получающиеся чувствительности показаны на правой части рисунка 5 штриховыми линиями. В качестве альтернативы, можно использовать чувствительность глубины выгорания для ограничения содержания плутония. После

расчета ошибок глубины выгорания модель реактора используется для расчета изменения долей деления плутония. Интервалы ошибок показываются сплошными черными линиями. Эти ошибки задаются как в терминах долей деления плутония на левой части рисунка, так и в соответствующих массах плутония на правой части.

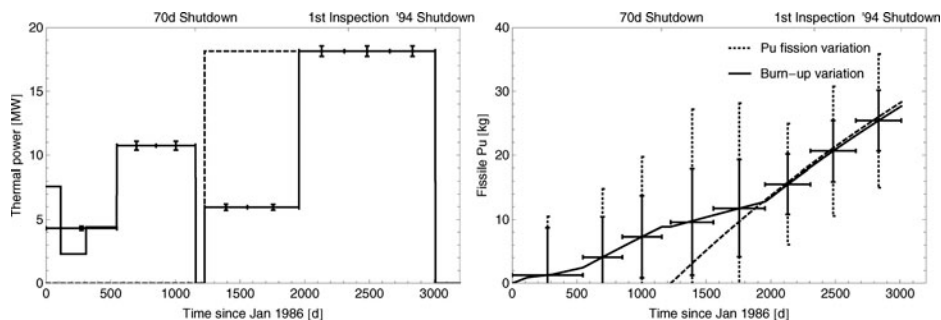


Рисунок 5. На левой части рисунка показаны стандартные отклонения ( $1\sigma$ ) чувствительности к мощности реактора (по вертикальной оси, в МВт) для различных периодов сбора данных (по горизонтальной оси отложено время в сутках с января 1986 года) на детекторе массой в 5 т на расстоянии в 20 м от реактора 5 МВт(эл.). Доли деления являются свободными параметрами в подгонке. На правой части рисунка показаны стандартные отклонения ( $1\sigma$ ) чувствительности к глубине выгорания как сплошные черные маркеры ошибок, где тепловая мощность является свободным параметром в подгонке. Пунктирные черные маркеры ошибок показывают стандартные отклонения ( $1\sigma$ ) чувствительности измерения скоростей деления плутония с мощностью реактора и скоростями деления урана как свободными параметрами в подгонке. Сплошные черные маркеры ошибок показывают стандартные отклонения ( $1\sigma$ ) чувствительности, определенные ограничением глубины выгорания с использованием модели реактора. Сплошная кривая показывает историю в предположении отсутствия отвлечения. Штриховая кривая показывает историю для случая полной разгрузки активной зоны в 1989 году. На вертикальной оси правой части рисунка отложено количество делящегося плутония в килограммах. На горизонтальной оси правой части рисунка отложено время в сутках с января 1986 года. Надписи выше левой и правой частей рисунка (слева направо): 1 – выключение на 70 суток; 2 – первая инспекция; 3 – выключение в 1994 году. Надписи на правой части рисунка (сверху вниз): 1 – вариация деления плутония; 2 – вариация глубины выгорания.

### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА 5 МВТ(ЭЛ.) ДЕТЕКТОРОМ У РЕАКТОРА ИРТ

Дополнительным преимуществом размещения детектора антинейтрино у реактора ИРТ является то, что он может также измерять антинейтрино от реактора 5 МВт(эл.). Отметим, что соответствующие скорости счета сигналов будут очень малы и наше приближение пренебрежительно малого фона не является надежно оправданным (смотрите раздел о влиянии фона). Такое измерение будет особенно полезным во время периодов выключения реактора ИРТ, что происходит примерно 100 дней в каждом году. Это привело бы к двум периодам измерений по 100 дней каждый для определения мощности реактора 5 МВт(эл.) в самое решающее время, после выключения на 70 дней и перед первой инспекцией, когда заявленная мощность была низкой, около 8 МВт(тепл.), но могла быть и такой высокой, как 18 МВт(тепл.), для того, чтобы привести вторую активную зону к той же самой конечной глубине выгорания (смотрите рисунок 4).

Предполагается, что сбор данных начинается вскоре после выключения ИРТ в момент, когда распались все короткоживущие изотопы, кроме долгоживущих изотопов, образующих антинейтрино: стронция-90, рутения-106 и церия-144. это произойдет через несколько дней. Количество атомов для каждого из долгоживущих изотопов равно:  $3,4 \cdot 10^{23}$  для стронция-90,  $2,8 \cdot 10^{23}$  для рутения-106 и  $2,5 \cdot 10^{23}$  для церия-144. Как и в предыдущем разделе, используется детектор массой 5 т на расстоянии 20 м от реактора ИРТ и 1,2 км от реактора 5 МВт(эл.) (смотрите рисунок 3). Данные собирались в течение двух периодов по 100 дней и зарегистрированный спектр показан на рисунке 6. Числа событий сигналов малы. Поэтому для определения  $\chi^2$ -функции используется соответствующее пуассоновское логарифмическое правдоподобие:

$$\chi^2 = 2 \sum_i \left[ n_i \log \frac{n_i}{n_i^0} - (n_i - n_i^0) \right] \quad n_i = NP_{th} \sum_l F_l S_{l,i} + LLI_i \quad (14)$$

где  $LL_i$  – вклад долгоживущих изотопов в  $i$ -ом интервале. Получившиеся чувствительности показаны на правой части рисунка 6. Это соответствует неопределенности около 3,8 МВт(тепл.) во время интересующих периодов. Различие в мощности реактора для второй активной зоны может быть обнаружено на уровне  $3,2 \sigma$ .

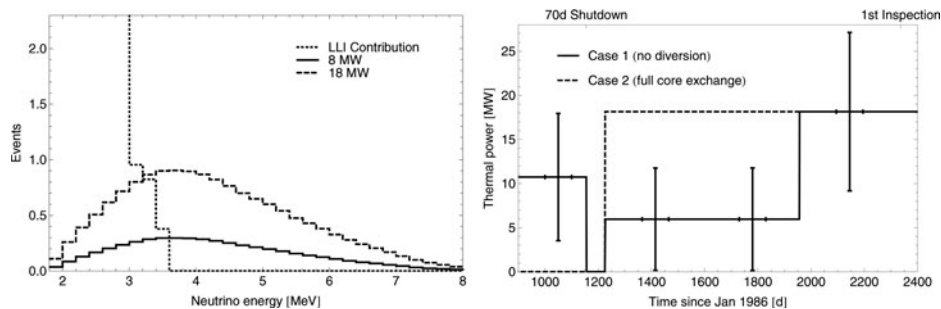


Рисунок 6. На левой части рисунка показаны события за 200 дней сбора данных на расстоянии в 20 м от выключенного реактора ИРТ и в 1,2 км от работающего реактора 5 МВт(эл.). Предполагается, что вклад реактора ИРТ в обнаруженный спектр антинейтрино обусловлен только долгоживущими изотопами (пунктирная линия на левой части рисунка). Предполагается, что реактор 5 МВт(эл.) работает либо на объявленной мощности 8 МВт(тепл.), что показано на сплошной кривой, либо на 18 МВт(тепл.), что показано на штриховой кривой. На горизонтальной оси левой части рисунка показана энергия нейтрино в МэВ, на вертикальной оси – число событий. На правой части рисунка показаны стандартные отклонения ( $1 \sigma$ ) чувствительности к мощности реактора, полученные из этого измерения. Сплошная кривая показывает историю мощности в предположении отсутствия отвлечения. Штриховая кривая показывает историю мощности, соответствующую отвлечению. На горизонтальной оси правой части рисунка показано время в сутках от января 1986 года, на вертикальной оси – тепловая мощность в МВт. Надписи выше правой части рисунка (слева направо): 1 – выключение на 70 суток; 2 – первая инспекция. Надписи на правой части рисунка (сверху вниз): 1 – случай 1 (нет отвлечения); 2 – случай 2 (замена всей активной зоны).

## ОБНАРУЖЕНИЕ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА

В дополнение к непосредственному мониторингу реакторов, детекторы антинейтрино могут быть использованы для обнаружения ядерных отходов или отработавшего топлива. При достаточном понимании того, где могут быть размещены отходы, находящийся поблизости детектор антинейтрино может распознать сигнатуру долгоживущих изотопов даже после многих лет хранения. В отличие от обычных методов, можно будет также обнаружить сильно защищенный или захороненный материал. Количество атомов для каждого из трех основных долгоживущих изотопов принималось равным:  $1,2 \cdot 10^{24}$  для стронция-90,  $1,4 \cdot 10^{24}$  для рутения-106 и  $3,7 \cdot 10^{22}$  для церия-144. Эти величины отражают, что можно будет ожидать в отходах (или отработавшем топливе) в момент времени первой инспекции, примерно через три года после выключения на 70 дней. В последующем анализе предполагается, что в течение 70 дней после выключения была выгружена вся активная зона, и что образовавшиеся при переработке отходы хранились вместе в одном из трех местоположений: "предполагаемом хранилище отходов", строения 500, или Радиохимической лаборатории<sup>48</sup>. Все три местоположения показаны на рисунке 3. Для строения 500 детектор не может быть расположен внутри огороженного участка, поскольку это строение было объявлено военным объектом, исключенным из доступа для осуществления гарантий<sup>49</sup>. Расстояния от объектов до детекторов находятся в диапазоне от 25 до 100 метров.

Из-за малой статистики событий использовалось пуассоновское логарифмическое правдоподобие, так же, как в уравнении (14), но с тем различием, что фоном теперь считались события от реактора 5 МВт(эл.), а сигнал определялся долгоживущими изотопами в отходах. Для наименьшего расстояния около 25 м может быть обнаружен сигнал в 8,9 события в год от предполагаемого хранилища отходов или перерабатывающего завода с фоном от реактора в 35,3 и 11,8 события в год, соответственно. Это приводит к временам обнаружения на уровне достоверности в 95 процентов, равным 0,33 и 0,15 года.

В этом расчете пренебрегалось всеми источниками фона, кроме реактора, что очевидно нереалистично (смотрите обсуждения влияния фона в соответствующем разделе). Кроме того, энергия антинейтрино от долгоживущих изотопов не превышает 3,6 МэВ, и поэтому следует предполагать, что детектор будет обнаруживать антинейтрино с энергией выше порога обратного бета-распада в 1,8 МэВ с практически полной эффективностью. Это требование может находиться в явном противоречии с требованием контроля фона.

## НЕПРЕРЫВНЫЙ МОНИТОРИНГ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНТИНЕЙТРИНО

Детектор антинейтрино, находящийся рядом с реактором во все время его эксплуатации, будет точно измерять мощность реактора (смотрите рисунок 5), и заявленная мощность должна будет всегда соответствовать измеренной мощности, и, поскольку глубина выгорания представляет собой проинтегрированную по времени тепловую мощность реактора, величина глубины выгорания может быть определена по полной истории мощности. В то же время, измеренная глубина выгорания, в отличие от определяемой глубины выгорания, также может быть определена по измерению антинейтрино. Рассматриваемый сценарий отвлечения опирается на возможность откорректировать мощность по отношению к заявленной мощности таким образом, чтобы в последующем мощность и глубина выгорания соответствовали друг другу. В присутствии детектора антинейтрино различие в глубине выгорания между объявленной и действительной глубиной выгорания в новой активной зоне будет зафиксировано. Тот факт, что детектор антинейтрино может одновременно измерять и мощность, и доли деления, позволяет обнаружить это различие в глубине выгорания. Для того, чтобы определить чувствительность в такой ситуации, используется модифицированное уравнение (13):

$$\chi^2 = \sum_t \sum_i \frac{1}{n_{i,t}^0} \left[ (1 + \alpha_{\text{det}}) P_{th}^t \sum_I F_I (BU^t) S_{I,i} - n_{i,t}^0 \right]^2 + \left( \frac{\alpha_{\text{det}}}{\sigma_{\text{det}}} \right)^2 \quad (15)$$

где  $t$  – индекс временного интервала для каждого измерения.  $\alpha_{\text{det}}$  – это параметр нормализации детектора с неопределенностью  $\sigma_{\text{det}} = 1\%$ .  $P_{th}^t$  – это тепловая мощность в каждом временном интервале  $t$ .  $F_I$  – это доли деления, которые являются функцией от глубины выгорания  $BU^t$  в каждом временном интервале  $t$ . Глубина выгорания является функцией времени, задающейся выражением:

$$BU^t = \left( \sum_{\tau=1}^{t-1} \frac{P_{th}^{\tau} \Delta \tau}{M_{\text{core}}} \right) + BU^0 \quad (16)$$

где  $\Delta \tau$  – ширина временного интервала,  $BU^0$  – начальная глубина выгорания в начале сбора данных, и  $M_{\text{core}}$  – масса активной зоны в терминах загрузки топлива. Если начальная глубина выгорания хорошо известна, как это было бы, если сбор данных начался при запуске реактора, такой анализ существенно уменьшит неопределенность в общем бюджете плутония. В таблице 2 общий бюджет ошибок определяется с помощью этого метода, обозначенного как "метод 2", и показывается в сравнении с теми результатами, которые были бы получены, если бы измерялась только глубина выгорания на базе результатов предыдущих разделов (обозначенная как "метод 1"), но не история мощности. Для метода 2 предположение состоит в том, что реактор начинает работу с хорошо известного состава, так что  $BU^0 = 0$  и все значения  $P$  являются свободными параметрами подгонки. Вопрос состоит в том, каково максимальное изменение  $BU^x$  в течение выключения на 70 дней. Значение преобразуется в получающуюся чувствительность к массе плутония с помощью модели реактора. Очевидно, что метод 1 менее точен, но он не требует непрерывного наблюдения, в то время как метод 2 намного более точен, но он требует непрерывного наблюдения. Ошибка определения плутония в реакторе 5 МВт(эл.), показанная в таблице 2, является ошибкой для комбинации извлеченного плутония, который мог быть извлечен в течение выключения реактора на 70 суток, и конечного содержания плутония при выключении реактора в 1994 году. Величины являются независимыми только тогда, когда данные берутся только после первой инспекции, и коррелируются, если они берутся с самого начала. Однородный анализ глубины выгорания добавляет фиксированную глубину выгорания к каждому временному интервалу, и конечная ошибка для плутония представляет собой конечную разницу количества плутония между увеличенными выгоранием данными и ожидаемыми данными. Анализ, ограниченный мощностью, предполагает, что начальный состав топлива известен, и глубина выгорания определяется интегрированием мощности с предполагаемой неопределенностью нормализации детектора в один процент. Ошибка в количестве плутония является максимальным различием в количестве плутония, допускаемым увеличением мощности и удалением топлива (в случае реактора 5 МВт(эл.)). Значения для чувствительности в  $1 \sigma$  задаются для максимизации количества плутония, доступными соответственно в активной зоне 1 и активной зоне 2. В скобках приводятся данные для неопределенности в активных зонах, в которых используются только данные из соответствующего раздела. Активные зоны 3 и 4 включают дополнительные загрузки топлива, которые облучались в реакторе 5 МВт(эл.) после 1994 года, и они добавлены для полноты изложения<sup>50</sup>.

Таблица 2. Содержание плутония и неопределенность ( $1\sigma$ ) приводятся для двух методов анализа для реактора 5 МВт(эл.).

		ГВ	Pu (кг)	ГВ	Pu (кг)	ГВ	Pu (кг)
5 МВт от	Зона 1	178	8,83	178	9,5*		
1 инспекции	Зона 2	648	27,7	95	3,29		
5 МВт от	Зона 1	178	8,83	138 (83)	6,68 (3,76')	43 (1,9)	2,12 (0,11)
запуска	Зона 2	648	27,7	52 (66)	1,81 (2,30')	6,7 (6,9)	0,23 (0,24)
5 МВт	Зона 3	307	14,6	51	2,17	3,2	0,14
5 МВт	Зона 4	255	12,3	53	2,36	2,7	0,12

ГВ – глубина выгорания, МВт-сутки/т.  
 \* – используя неопределенность из книги Олбрайта и О'Нила<sup>41</sup>.  
 ' – эти две величины антикоррелируют с коэффициентом корреляции -0,962.

## ВЛИЯНИЕ ФОНА

До сих пор в данном анализе фоном, не относящимся к излучению нейтрино, пренебрегалось. Фоновые излучения от реактора, не связанные с нейтрино, такие, как гамма-лучи и нейтроны, рождающиеся в результате ядерных реакций внутри реактора, на расстоянии 20 м вне здания реактора не должны превышать естественной радиоактивности. Остающиеся главные фоновые события в детекторах обратного бета-распада таковы: случайные события, в которых два некоррелированных события, вызванных внешним излучением в детекторе, случайно выполняют требования задержанного совпадения как по времени, так и по энергии; фоновые события, вызванные быстрыми нейтронами, в которых быстрый нейтрон входит в детектор, не оставляя следа, и рассеивается на протоне, который затем имитирует первичное выделение энергии позитрона, а впоследствии нейтрон термализуется и захватывается как настоящий нейтрон от обратного бета-распада; фоновые события  $\beta$ - $n$ , в которых во взаимодействии с космическими мюонами образуется короткоживущий радиоактивный изотоп, который распадается по каналу бета-распада с задержанным испусканием нейтрона, имитируя событие антинейтрино. Скорость случайных событий определяется скоростью внешних радиоактивных распадов. Быстрые нейтроны образуются в результате взаимодействий космических лучей в материалах, окружающих детектор, и поэтому зависят от потока мюонной компоненты космических лучей; то же самое относится к фоновым событиям  $\beta$ - $n$ . Поэтому измеренные скорости счета фоновых событий от этих двух источников могут быть экстраполированы от подземных расположений, в которых помещается большая часть современных детекторов антинейтрино к поверхности<sup>51</sup>. Используя результаты измерений в эксперименте "Double Chooz" на глубине, соответствующей 300 метрам водного эквивалента (м.в.э.)<sup>52</sup>, и экстраполируя проблему к детектору, расположенному на поверхности, можно получить следующие значения скоростей счета фоновых событий: 1/сутки-тонну для событий от быстрых нейтронов, и 43/сутки-тонну для событиям  $\beta$ - $n$ , где предполагается, что вещество детектора состоит из  $\text{CH}_2$ . Эти скорости счета во много раз превосходят скорость счета случайных событий, и поэтому случайными событиями можно пренебречь. Эта экстраполяция проверялась на нескольких наборах данных от различных экспериментов в диапазоне глубин от 850 до 120 м.в.э. и было найдено, что экстраполяция является точной в пределах множителя 2.<sup>53</sup> На очень малых глубинах менее 10 м.в.э. нельзя пренебрегать адронной компонентой и экстраполяция перестает быть достоверной. Помня об этой оговорке, можно считать, что отношение сигнала к шуму для прямых измерений на реакторе 5 МВт(эл.) и на реакторе ИРТ будет лежать в пределах от 10:1 до 2:1. С другой стороны, для паразитных измерений реактора ИРТ и обнаружения отходов фон будет от 100 до 1000 раз сильнее сигнала. Очевидно, что необходимо достичь весьма существенных успехов в технологии детекторов, чтобы переместить такие вторичные измерения в область возможного. Требуемый фактор подавления можно будет существенно уменьшить, обеспечив умеренное заглубление в 10 – 20 м.в.э., что, в принципе, можно будет предусмотреть в несущей конструкции детектора.

К счастью, сейчас в нескольких странах предпринимаются экспериментальные усилия, направленные на исследования и разработки в области создания детекторов антинейтрино с значительно улучшенным подавлением шума. Эти инициативы мотивируются поиском новой частицы, называемой стерильным нейтрино, с помощью детекторов антинейтрино от реакторов, расположенных в нескольких метрах от активной зоны реактора<sup>54</sup>. Тесная близость к активной зоне реактора приводит к высокой интенсивности фона, который может включать значительный поток нейтронов и гамма-лучей от самого реактора. Почти все рассматриваемые площадки реакторов могут предоставить лишь минимальное заглубление в 10 м.в.э., или менее. Поэтому такие эксперименты столкнутся с существенно той же величиной проблем в терминах условий отношения сиг-

нала к шуму, что и детекторы для гарантий при условиях, намеченных в данной статье<sup>55</sup>.

### ВРЕМЕННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОБЫТИЙ ПРИ ПОЛНЫХ ГАРАНТИЯХ НА БАЗЕ АНТИНЕЙТРИНО

События 1994 года придали особую важность пониманию реальной истории плутониевой программы Северной Кореи и поэтому были разработаны действительные методы, не относящиеся к антинейтрину. Основная концепция этих методов заключалась в картировании трехмерного распределения глубины выгорания внутри активной зоны реактора<sup>56</sup>. Одной из возможностей была выгрузка примерно 300 из 8000 топливных стержней и измерение их гамма-излучения, в основном от цезия-137, который является хорошим указателем на глубину выгорания. Согласно мнению эксперта из Лос-Аламосской национальной лаборатории, активно задействованного в анализе проблемы КНДР 1994 года, этот метод обеспечивает точность определения глубины выгорания менее пяти процентов, если имеются высококачественные калибровочные данные<sup>57</sup>.

Другой метод основан на взятии образцов графита из реактора и измерении изотопных отношений некоторых следовых элементов для реконструкции трехмерной карты интегральной плотности потока нейтронов. Этот метод изотопных отношений в графите (GIRM) был впервые предложен Феттером в 1983 году<sup>58</sup>, и впоследствии был достаточно подробно разработан в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории. Ожидается, что общая точность будет находиться в диапазоне от 1 до 5 процентов<sup>59</sup>. Точность измерений нейтринно попадает в тот же самый общий диапазон, который доступен обычными средствами. Отчетливое различие в степени интрузивности, которая в порядке убывания идет от метода изотопных отношений в графите, который требует сверления достаточно крупных отверстий в замедлителе, к выборке отработавшего топлива, которая требует широкого доступа во время перезагрузки топлива, и к мониторингу на базе антинейтринно, который требует доступа только к внешней стене здания реактора. Кроме того, регистрация антинейтринно является единственным методом, предоставляющим информацию в масштабе недель одновременно с эксплуатацией оператора, что предоставляет существенное преимущество в контексте сценариев выхода из режима.

На основании количественных результатов и временной последовательности событий 1994 года можно было бы осуществить следующий сценарий:

- Реактор ИРТ находится под полными гарантиями на базе антинейтринно с 1978 года с выделенным 5-тонным детектором, который расположен вне здания реактора ИРТ у южной стены.
- Реактор 5 МВт(эл.) находится под полными гарантиями на базе антинейтринно с мая 1992 года с выделенным 5-тонным детектором, который расположен вне здания реактора 5 МВт(эл.) у западной стены.
- Поиск излучения антинейтринно от переработанных отходов был начат в ноябре 1992 года. Были размещены три 5-тонных детектора: один на перерабатывающем заводе; один на предполагаемом хранилище отходов, расположенном над центром хранилища отходов; и один у строения 500, расположенный справа за южным забором.

Этот сценарий полностью согласуется с *реальным* доступом по гарантиям, который имела МАГАТЭ, и, в частности, все местоположения размещения детекторов отражают реальный физический доступ. В результате расстояния от детекторов до реакторов ИРТ и 5 МВт(эл.) составляли 20 м, расстояния от детекторов до предполагаемого хранилища отходов и перерабатывающего завода равнялись 25 м, а от детектора до строения 500 – 80 м.

Далее, мы предполагаем, что в 1989 году КНДР выгрузило первую полную активную зону, что, кажется, подтверждается декларацией КНДР 2008 года о том, что она обладает 30 кг плутония<sup>60</sup>. После переработки отработавшего топлива отходы хранились где-то на перерабатывающем заводе<sup>61</sup>. И, наконец, предполагалось, что глубина выгорания, объявленная КНДР в 1992 году, была правильной<sup>62</sup>.

Первый относящийся к делу набор данных мог быть получен детектором у реактора ИРТ в течение периодов, когда реактор ИРТ был выключен, примерно 100 дней в каждом году. Сигнал антинейтринно, сопровождающий работу реактора 5 МВт(эл.), является очевидно обнаружимым при таком расположении детектора, и он предоставляет измерение мощности реактора. В 1989 году этот сигнал был бы зарегистрирован. Вскоре после того, как КНДР представила свою первоначальную декларацию МАГАТЭ в мае 1992 года, эти данные привели бы к расхождению, которое, в комбинации с результатами сбора образцов окружающей среды, привели бы к выводу о том, что в 1989 году было выделено большое количество плутония. Чувствительность такого измерения равнялась бы 2,55 кг плутония. Принимая 4 кг плутония за количество, необходимое для изготовления атомной бомбы<sup>63</sup>, этот результат соответствовал бы уверенности в 12:13 в том, что у КНДР бы-

ло достаточно плутония по крайней мере на одну бомбу.

В ноябре 1993 года после года сбора данных детекторы на предполагаемом хранилище отходов не могли бы ничего обнаружить, так же как и детектор у строения 500. Детектор на перерабатывающем заводе мог бы показать присутствие высокоактивных отходов<sup>64</sup> (или отработавшего топлива) с соответствующей точностью определения плутония в 1,67 кг. Более того, с высокой степенью уверенности было бы известно, что было выделено (или по крайней мере извлечено из реактора) количество плутония, достаточное для одного боеприпаса. Шестью месяцами позже, в мае 1994 года, детектор у реактора 5 МВт(эл.) подтвердил бы декларацию КНДР о глубине выгорания с точностью в 15 процентов. В комбинации из этих результатов следовало бы, что с вероятностью в 56 процентов имеется достаточно плутония для изготовления двух, или более бомб.

В целом, если КНДР позволило бы установить и эксплуатировать детекторы, то гарантии на базе антинейтринно могли бы в рассматриваемых сценариях существенно изменить состояние информации. Наличие выделенной первой активной зоны было бы установлено с очень высокой степенью достоверности, и тот факт, что активная зона была переработана (или была перемещена на установку переработки), был бы известен с очень высокой достоверностью. Было бы известно с высокой степенью достоверности, что, по крайней мере, было выделено достаточно плутония для изготовления одной атомной бомбы. Имелись бы некоторые указания на то, что выделенного плутония было бы достаточно для двух бомб; и вся эта информация стала бы доступной в конце 1993 года.

Имеется много аргументов, которые могли бы быть выдвинуты против сценария, рассмотренного в предыдущих абзацах. С технической стороны, детекторы антинейтринно, которые могли бы достичь требуемого уровня подавления фона, в 1990-х годах еще не существовали, и их не существует сейчас, по крайней мере, не с продемонстрированными возможностями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг антинейтринно от реактора представляет уникальные возможности, которые, как представляется, делают этот метод, предложенный более 30 лет назад, полезным средством для гарантий. Кроме того, детекторы антинейтринно постоянно совершенствовались со времен Коуэна и Рейнеса, и могут сейчас считаться развитой технологией. Благодаря особенностям образования и детектирования антинейтринно, гарантии на базе антинейтринно обеспечивают измерения таких параметров активной зоны реактора, как мощность и глубина выгорания. Это отличает их от текущего подхода к гарантиям, который в основном базируется на учете позиций, и, в частности, в настоящее время МАГАТЭ не проводит рутинных измерений мощности или глубины выгорания<sup>65</sup>, и не подтверждает их независимыми вычислениями ни на каком реакторе.

Используя ядерный кризис 1994 года в КНДР в качестве виртуальной лаборатории, было показано, что мониторинг антинейтринно от реактора может позволить МАГАТЭ обнаруживать необъявленное производство плутония или определять отвлечение объявленного плутония на уровне одного существенного количества, то есть 8 кг плутония в течение 90 дней с уровнем достоверности в 90 процентов на реакторах с замедлителем из обычной воды с мощностью менее 1 ГВт(тепл.) и на реакторах с тяжеловодным замедлителем с мощностью 0,1 ГВт(тепл.). Гарантии на базе антинейтринно позволяют сделать своевременные выводы о содержании плутония в активной зоне реактора и обнаружении потенциального отвлечения, в то время как обычные методы предоставляют информацию только после факта, когда реактор был выключен и разгружен. Для всех этих применений детекторы антинейтринно будут работать с минимальным заглублением, или даже на поверхности, и чем ниже будет остаточный фон, тем более разносторонней будет созданная система.

В заключение, представленные в данной статье результаты позволяют предположить, что гарантии на базе антинейтринно могут быть подходящим и интересным выбором для мониторинга различных типов исследовательских реакторов и для большей части планируемых коммерческих небольших модульных реакторов. По тем же самым причинам тяжеловодный реактор Арак, расположенный в Исламской республике Иран, может стать идеальным испытательным полигоном для гарантий на базе антинейтринно.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим Роберта Галуччи, Криса Геша, Ховарда Менлоува, и Брюса Рейда за их согласие дать интервью для данного проекта. Мы также благодарим А. Эрисксона, Л. Калоусиса, Ц. Мариани, и, в особенности, Т. Ши за их экспертные заключения по многим техническим вопросам, относящимся к ядерным реакторам, детекторам антинейтринно и гарантиям. Мы благодарим М. Фаллотза за представление потоков антинейтринно от реакторов машинно-читаеваемой форме и мы также приветствуем полезные обсуждения о твердых сегментированных детекторах антинейтринно с А. Вачаретом и А. Вебером.



## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа была поддержана Министерством энергетики США по контракту DE- SC0003915 и по гранту программы "Инициатива глобальных проблем" от Института общества, культуры и окружающей среды Виргинского технического университета.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. C. L. Cowan et al., "Detection of the Free Neutrino: A Confirmation," *Science* 124 (1956): 103–104.
2. A. A. Borovoi and L. A. Mikaelyan, "Possibilities of the practical use of neutrinos," *Soviet Atomic Energy* 44 (1978): 589.
3. A. Bernstein et al., "Nuclear Reactor Safeguards and Monitoring with Antineutrino Detectors," *Journal of Applied Physics* 91 (2002): 4672; M. M. Nieto et al., "Detection of Anti-neutrinos for Nonproliferation," *Nuclear Science and Engineering* 149 (2003): 270–276; P. Huber and T. Schwetz, "Precision Spectroscopy with Reactor Antineutrinos," *Physical Review D* 70 (2004): 053011; A. C. Misner, "Simulated Antineutrino Signatures of Nuclear Reactors for Nonproliferation Applications" (PhD thesis, Oregon State University, 2008); A. Bernstein et al., "Nuclear Security Applications of Antineutrino Detectors: Current Capabilities and Future Prospects," *Science and Global Security* 18 (2010): 127–192; V. Bulaevskaya and A. Bernstein, "Detection of Anomalous Reactor Activity Using Antineutrino Count Rate Evolution Over the Course of a Reactor Cycle," *Journal of Applied Physics* 109 (2011): 114909; A. C. Hayes et al., "Theory of Antineutrino Monitoring of Burning MOX Plutonium Fuels," *Physical Review C* 85 (2012): 024617; P. Huber, "Spectral Antineutrino Signatures and Plutonium Content of Reactors," in Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Institute for Nuclear Materials Management (INMM) (Institute of Nuclear Materials Management, 2012), 7797.
4. J. S. Wit, D. Poneman, and R. L. Gallucci, *Going Critical: The First North Korean Nuclear Crisis* (Washington, DC: Brookings Institution Press, 2007).
5. Borovoi and Mikaelyan, "Possibilities of the Practical use of Neutrinos." (ссылка 2)
6. V. A. Korovkin et al., "Measuring Nuclear Plant Power Output by Neutrino Detection," *Soviet Atomic Energy* (1988): 712–718.
7. Y. V. Klimov et al., "Measurement of Variations of the Cross Section of the Reaction  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  in the  $\bar{\nu}_e$  flux from a Reactor," *Soviet Journal of Nuclear Physics* 51, 2 (1990): 225–258.
8. Huber and Schwetz, "Precision Spectroscopy with Reactor Anti-neutrinos." (ссылка 3)
9. Y. V. Klimov, V. I. Kopeikin, L. A. Mikae'lyan, K. V. Ozerov, and V. V. Sinev, "Neutrino Method Remote Measurement of Reactor Power and Power Output," *Atomic Energy* 76, 2 (1994): 123–127; Huber, "Spectral Antineutrino Signatures and Plutonium Content of Reactors." (ссылка 3)
10. A. Bernstein, N. S. Bowden, A. Misner, and T. Plamer, "Monitoring the Thermal Power of Nuclear Reactors with a Prototype Cubic Meter Antineutrino Detector," *Journal of Applied Physics* 103 (2008): 074905.
11. F. P. An et al., "Observation of Electron-antineutrino Disappearance at Daya Bay," *Physical Review Letters* 108 (2012): 171803.
12. Y. Declais et al., "Search for Neutrino Oscillations at 15-meters, 40-meters, and 95- meters from a Nuclear Power Reactor at Bugey," *Nuclear Physics B* 434 (1995): 503–534.
13. Y. Abe et al., "Indication for the Disappearance of Reactor Electron Antineutrinos in the Double Chooz Experiment," *Physical Review Letters* 108 (2012): 131801; An et al., "Observation of Electron-antineutrino Disappearance at Daya Bay" (ссылка 11); J. K. Ahn et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment," *Physical Review Letters* 108 (2012): 191802.
14. Эффективность определяется как отношение числа взаимодействий нейтрино, идентифицированных как таковых, по отношению к общему числу взаимодействий нейтрино, произошедших в детекторе.
15. Y. Abe et al., "Indication for the Disappearance of Reactor Electron Antineutrinos in the Double Chooz Experiment" (ссылка 13); An et al., "Observation of Electron-antineutrino Disappearance at Daya Bay" (ссылка 11); Ahn et al., "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment." (ссылка 13)
16. P. Vogel and J. F. Beacom, "Angular Distribution of Neutron Inverse Beta Decay," *Physical Review D* 60 (1999): 053003.
17. Эта величина взята из A. Serebrov et al., "Measurement of the Neutron Lifetime Using a Gravitational Trap and a Low-temperature Fomblin Coating," *Physics Letters B* 605 (2005): 72–78.
18. S. Oguri et al., "Reactor Antineutrino Monitoring with a Plastic Scintillator Array as a New Safeguards Method," *Nuclear Instruments and Methods A* 757 (2014): 33–39.

19. V. Kopeikin, L. Mikaelyan, and V. Sinev, "Reactor as a Source of Antineutrinos: Thermal Fission Energy," *Physics of Atomic Nuclei* 67 (2004): 1892–1899.
20. T. A. Mueller et al., "Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra," *Physical Review C* 83 (2011): 054615; M. Fallot et al., "New Antineutrino Energy Spectra Predictions from the Summation of Beta Decay Branches of the Fission Products," *Physical Review Letters* 109 (2012): 202504.
21. F. Feilitzsch, A. A. Hahn, and K. Schreckenbach, "Experimental Beta Spectra from Pu-239 and U-235 Thermal Neutron Fission Products and Their Correlated Antineutrino Spectra," *Physics Letters B* 118 (1982): 162–166; K. Schreckenbach et al., "Determination of the Anti-neutrino Spectrum from U-235 Thermal Neutron Fission Products up to 9.5 MeV," *Physics Letters B* 160 (1985): 325–330; A. A. Hahn et al., "Antineutrino Spectra from Pu-241 and Pu-239 Thermal Neutron Fission Products," *Physics Letters B* 218 (1989): 365–368; N. Haag et al., "Experimental Determination of the Antineutrino Spectrum of the Fission Products of  $^{238}\text{U}$ ," *Physical Review Letters* 112 (2014): 122501.
22. P. Huber, "On the Determination of Anti-neutrino Spectra from Nuclear Reactors," *Physical Review C* 84 (2011): 024617.
23. P. Huber, "Anti-neutrino Spectra" (ссылка 22); A. C. Hayes et al., "Reanalysis of the Reactor Neutrino Anomaly," *Physical Review Letters* 112 (2014): 202501.
24. Fallot et al., "New Antineutrino Energy Spectra Predictions from the Summation of Beta Decay Branches of the Fission products." (ссылка 20)
25. P. Huber, "Anti-neutrino Spectra." (ссылка 22)
26. Проблеме выхода антинейтрино недавно было уделено значительное внимание. До работы группы S. Mueller et al., "Improved Predictions," 2011 года результаты Schreckenbach et al. (ссылка 21), Feilitzsch, Hahn, and Schreckenbach, "Experimental Beta Spectra from Pu-239 and U-235 Thermal Neutron Fission Products and Their Correlated Anti-neutrino Spectra" (ссылка 21); Schreckenbach et al., "Determination of the Anti-neutrino Spectrum from U-235 Thermal Neutron Fission Products up to 9.5 MeV" (ссылка 21); Hahn et al., "Anti-neutrino Spectra from Pu-241 and Pu-239 Thermal Neutron Fission Products" (ссылка 21), полученные в 1980-х годах в Институте Лауэ-Ланжевена в Гренобле рассматривались как "золотой стандарт". Группа Сакле вернулась к прежним результатам в попытке уменьшить неопределенности. Вместо этого они обнаружили сдвиг вверх центрального значения среднего выхода примерно на 3 процента, в то время как бюджет ошибок в основном остался неизменным. Вместе с влиянием других факторов, прежние результаты, по видимому, показывали дефицит скорости счета нейтрино примерно в 6 процентов; этот эффект был назван *аномалией реакторных нейтрино* и он впервые обсуждался в работе G. Mention et al., "The Reactor Antineutrino Anomaly," *Physical Review D* 83 (2011): 073006. Результат с увеличенным потоком был независимо подтвержден одним из авторов (ссылка 22). Правдоподобное объяснение может появиться в форме новой частицы, стерильного антинейтрино, которая не предсказывается стандартной моделью физики элементарных частиц. Учитывая широкие последствия существования такого стерильного антинейтрино, возник заметный всплеск исследовательской деятельности. Недавний обзор можно найти в работе K. N. Abazajian et al., "Light Sterile Neutrinos: A White Paper" (2012), <http://arxiv.org/abs/1204.5379>.
27. P. Huber, "Spectral Antineutrino Signatures and Plutonium Content of Reactors." (ссылка 3)
28. F. P. An et al., "A Side-by-Side Comparison of Daya Bay Antineutrino Detectors," *Nuclear Instruments and Methods A* 685 (2012): 78–97.
29. SCALE – это пакет программ для создания и расчетов моделей для анализа ядерной безопасности и конструирования, разработанный и поддерживаемый Ок-Риджской национальной лабораторией по контракту с Комиссией ядерного надзора США, Министерством энергетики США и Национальной администрации ядерной безопасности. Этот пакет доступен на сайте <http://www.ornl.gov/sci/scale>.
30. MTU означает метрическую тонну урана или тяжелого металла, то есть всех актинидов.
31. D. Albright and C. Walrond, *Update on the Arak Reactor*, Technical Report (Institute for Science and International Security (ISIS), July 2013).
32. International Atomic Energy Agency, *IAEA Safeguards Glossary* (International Atomic Energy Agency, 2002).
33. D. Oberdorfer, *The Two Koreas: A Contemporary History* (Basic Books, 2001), 269.
34. D. Albright, "How Much Plutonium Does North Korea Have?," *Bulletin of the Atomic Scientists* 50, 5 (1994): 46.
35. Там же.
36. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013.
37. Albright, "How Much Plutonium Does North Korea Have?" (ссылка 34)
38. Wit, Poneman, and Gallucci, *Going Critical*. (ссылка 4)
39. S. Hecker and W. Liou, "Dangerous Dealings: North Korea's Nuclear Capabilities and the Threat of Export to Iran," *Arms Control Today* 37 (2007): 6–8; S. Hecker, "Lessons Learned From the North Korean Nuclear Crises,"

- Dædalus Winter* (2010): 44–56.
40. S. Hecker, "Lessons learned." (ссылка 39)
  41. D. Albright and K. O'Neill, eds., *Solving the North Korean Nuclear Puzzle* (Washington, DC: ISIS Press, 2000), 148.
  42. В принципе реакторы "Magnox" можно перезагружать во время работы, но кажется, в то время КНДР не пользовалось этой технологией.
  43. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013, Хейнонен подтвердил, глядя на рисунок VI.2 в книге *Nuclear Puzzle* (ссылка 41), что он является точным описанием глубины выгорания.
  44. Albright and O'Neill, *Nuclear Puzzle*. (ссылка 41)
  45. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013, Хейнонен оценивает верхний предел в 0,5 – 1 кг, основываясь на подробных данных о выгорании топлива, которые МАГАТЭ получило в рамках соглашения по гарантиям реактора ИРТ.
  46. В принципе количества долгоживущих изотопов стронция-90, рутения -106, и церия-144 будут различными для двух историй облучения, что приведет к различиям в спектре антинейтрино низких энергий ниже 3,6 МэВ. Однако, подробные вычисления показали, что получившиеся различия скоростей счета в 1992 году слишком малы, чтобы быть надежно обнаруженными.
  47. Albright and O'Neill, *Nuclear Puzzle*. (ссылка 41) 148–149
  48. Albright and O'Neill, *Nuclear Puzzle*; O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013, Хейнонен не считает, что жидкие высокоактивные отходы были перемещены в строение 500.
  49. Albright and O'Neill, *Nuclear Puzzle*. (ссылка 41) 149–154
  50. D Albright and C. Walrond, *North Korea's Estimated Stocks of Plutonium and Weapon-Grade Uranium*, technical report (Washington, DC: ISIS, August 2012).
  51. Y. Abe et al., "Direct Measurement of Backgrounds using Reactor-off Data in Double Chooz," *Physical Review D* 87 (2013): 011102.
  52. Заглубление часто выражается в метрах водного эквивалента (м.в.э.), обычно 1 метр скал или грунта соответствует 2 – 3 м.в.э.
  53. Там же.
  54. Abazajian et al., "Light Sterile Neutrinos: A White Paper."
  55. Z. Djurcic et al., "PROSPECT—A Precision Reactor Neutrino and Oscillation Spectrum Experiment at Very Short Baselines" (2013), <http://arxiv.org/abs/1309.7647>; I. Alekseev et al., "DANSSino: A Pilot Version of the DANSS Neutrino Detector," *Physics of Particles and Nuclei Letters* 11 (2014): 473–482; A. P. Serebrov et al., "On Possibility of Realization NEUTRINO-4 Experiment on Search for Oscillations of the Reactor Antineutrino into a Sterile State" (2013), <http://arxiv.org/abs/1310.5521>.
  56. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013; B. Reid and C. Gesh, phone interview by PH, 15 May 2013.
  57. H. Menlove, частное сообщение.
  58. S. Fetter, "Nuclear Archeology: Verifying Declarations of Fissile-Material Production," *Science and Global Security* 3 (1993): 237–259.
  59. P. Heasler et al., "Estimation Procedures and Error Analysis for Inferring the Total Plutonium (Pu) Produced by a Graphite-Moderated Reactor," *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006): 1406–1413.
  60. Albright and Walrond, *North Korea's Estimated Stocks of Plutonium and Weapon-Grade Uranium*. (ссылка 50)
  61. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013.
  62. Albright and O'Neill, *Nuclear Puzzle*; O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013.
  63. T. B. Cochran and C. E. Paine, *The Amount of Plutonium and Highly-enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons*, Technical Report (Washington, DC: Natural Resources Defense Council, 1995).
  64. O. Heinonen, Interview by PH, 16 April 2013; S. Hecker, *Report of Visit to the Democratic People's Republic of North Korea (DPRK) Pyongyang and the Nuclear Center at Yongbyon, Feb. 12–16, 2008*, Technical Report (Center for International Security and Cooperation, March 2008).
  65. S. Kutchesfahani and M. Lombardi, "South Africa," in *Nuclear Safeguards, Security and Nonproliferation: Achieving Security with Technology and Policy*, ed. James Doyle (Boston: Butterworth-Heinemann, 2008).