

ОЦЕНКА РЕГИСТРАЦИИ АНТИНЕЙТРИНО КАК МЕТОДА МОНИТОРИНГА ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Адам Бернстейн, Тодд Уэст, Випин Гупта

Антинейтрино является единственной истинно ядерной сигнатурой реального времени от ядерного взрыва, распространяющейся на большие расстояния сквозь воздух, воду и грунт. За последние десять лет размеры и чувствительность детекторов антинейтрино значительно выросли, и этот процесс будет продолжаться и в следующем десятилетии, частично благодаря возродившемуся интересу к физике нейтрино из-за накапливающихся указаний на возможное наличие массы у нейтрино. Развитие детекторов антинейтрино и очевидный интерес к сигнатуре как средству мониторинга ядерных испытаний послужили мотивами для написания этого обзора возможностей существующих и возможных будущих детекторов как средств верификации прекращения испытаний. Существующие ионизационные детекторы с жидким сцинтиллятором, работающие на глубине в десятки метров под землей и содержащие несколько тысяч тонн активного материала, могут быть использованы для мониторинга площади в несколько квадратных километров для ядерных взрывов уровня мощности в 1 кт. Черенковские детекторы с очищенной водой с размерами, характерными для современных установок ($50\,000\text{ м}^3$) могут быть использованы для обнаружения взрывов мощностью в 1 кт на расстояниях в десятки километров. Добавление в очищенную воду поглощающих нейтроны добавок (хлорида натрия или гадолиния) позволят увеличить радиус обнаружения до примерно 1000 км при чувствительности в импульсе в 10 антинейтрино для взрыва в 1 кт. За пределами 1000 км фон от ядерных реакторов во всем мире будет слишком большим (для этой предполагаемой мощности сигнала). Технические проблемы создания таких детекторов будут весьма значительными. Размеры детектора с добавками с радиусом обнаружения в 100 км, подходящего для кооперативного мониторинга существующих полигонов для ядерных испытаний, будут примерно в 60 раз больше самого большого из существующих водных детекторов, а количество фотоумножителей будет в десятки раз больше того, которое используется сейчас в крупных физических экспериментах. Капитальные затраты (в основном на фотоумножители, на земляные работы и на поддержку высокой степени радиационной чистоты) будут составлять несколько миллиардов долларов, даже для детектора с такими умеренными характеристиками.

Детекторы, способные обнаружить взрыв в 1 кт на расстоянии всего в несколько километров, все равно будут стоить десятки миллионов долларов. Из-за этих ограничений практическое применение этого метода для обнаружения ядерных испытаний в обозримом будущем останется практически недоступным.

Авторы работают в Ливерморском отделении Национальной лаборатории Сандия. Адам Бернстейн работает по контракту в группе регистрации излучений (организация 8418), Тодд Уэст является старшим техническим сотрудником отдела системных исследований (организация 8114), а Випин Гупта – старшим техническим сотрудником группы перспективных концепций (организация 11000).

ВВЕДЕНИЕ

Для верификации договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) могут использоваться сейсмические, радиохимические, гидроакустические и инфразвуковые детекторы. Все вместе и по отдельности эти детекторы позволяют обнаруживать, идентифицировать и локализовать ядерные взрывы в атмосфере, под водой, или под землей. Они входят в состав предлагаемой международной системы мониторинга, которая, хотя и является всеобъемлющей, имеет определенные ограничения. Может быть, самым существенным ограничением является то, что система может оказаться неспособной надежно и в реальном времени идентифицировать подземный взрыв очень малой мощности (меньше или

порядка 1 кт) с ядерным взрывом, в особенности, если будут использоваться обходные методы, такие, как сейсмическая развязка¹. Это ограничение существует из-за того, что ударные волны и излучение от подземного взрыва ослабляются или поглощаются самой Землей. Однако, Земля прозрачна для одной из форм ядерных излучений – для антинейтрино. Обнаружение мощного всплеска антинейтрино, образующегося при ядерном взрыве, может позволить идентифицировать взрывы малой мощности, или взрывы с сейсмической развязкой, и благодаря этому помочь разрешить неопределенности, которые имеются в современной системе мониторинга.

Основная идея о регистрации антинейтрино, излучаемых при ядерном взрыве, время от времени возникала еще с тех пор, когда антинейтрино было впервые обнаружено в 50-х г.г.²

Прим. ред. русского издания: Как вспоминает Уильям Огл, бывший руководитель отделения испытаний в Лос-Аламосской Национальной лаборатории, Фред Рейнес, впервые непосредственно зарегистрировавший антинейтрино в 1954 году, и получивший за это открытие Нобелевскую премию 1995 года, сначала предполагал регистрировать антинейтрино от ядерного взрыва, но потом решил, что эксперимент на реакторе будет более чувствительным [William E. Ogle, An Account of the Return to Nuclear Weapons Testing by the United States after the Test Moratorium 1958 – 1961, U.S. Department of Energy, Nevada Operations Office, NVO-291, October 1985, p. 84].

С тех пор развитие технологии регистрации привело к созданию очень больших детекторов с низким уровнем шума; детектор объемом в 50 000 м³ уже построен в Японии (Супер Камиоканде, закончен в 1995 г.). а детектор объемом в 1 км³ предлагается построить на Южном полюсе³. Учитывая эти последние и планируемые увеличения масштабов и чувствительности, уникальные свойства нейтринной сигнатуры ядерных взрывов, и отсутствие научного обзора возможностей детекторов нейтрино в этом аспекте, было бы полезно исследовать потенциал этих систем и рассмотреть улучшения, которые могут потребоваться для того, чтобы сделать их полезными для целей верификации запрещения испытаний.

В этой статье мы обсудим перспективы обнаружения импульса антинейтрино, сопровождающего ядерный взрыв малой мощности. Мы рассмотрим два основных применения: кооперативный мониторинг на умеренных расстояниях от испытаний (меньше нескольких сотен километров) и независимый дистанционный мониторинг на больших расстояниях (от 1000 км до радиуса Земли).

Мы начнем с краткого обзора некоторых важных существующих методов верификации, включая четыре официально принятых для использования в международном режиме верификации ДВЗЯИ. Затем мы рассмотрим возможную полезность детекторов антинейтрино как дополнительных средств мониторинга для верификации запрещения испытаний. После этого мы исследуем чувствительность двух типов детекторов антинейтрино к всплескам антинейтрино от деления, включая оценки радиуса действия, размеров детектора, фона и требований к инфраструктуре. В заключение мы оценим потенциал детекторов антинейтрино для верификации запрещения испытаний и возможные направления будущих исследований.

Существующие методы верификации ДВЗЯИ

Для верификации договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний могут быть использованы разнообразные дистанционные методы и методы проверки на месте, каждый из которых предоставляет уникальные возможности обнаружения. Методы могут быть использованы для поиска ядерных взрывов в атмосфере, под водой, под землей, или в косми-

¹ http://www.ctbt.rnd.doe.gov/ctbt/introduction/onsite_inspections.html

² См., например, T. Bowles and M. Silbar, "The Neutrino in 1980", Los Alamos Science, (1981): 2:1, 94.

³ Информацию о детекторе Супер Камиоканде можно найти в сети Интернет по адресу <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/super-kamiokande.html>, а описание ледового детектора объемом в кубический километр можно найти в сети Интернет по адресу <http://amanda.berkeley.edu/km3>

ческом пространстве. Применение датчиков различных типов повышает надежность обнаружения, и может помочь в идентификации неоднозначных явлений.

Методы проверки на месте⁴

Возможные методы обнаружения ядерных взрывов проверками на месте включают сейсмические, радиохимические, гидродинамические, гамма-, рентгеновские и нейтронные детекторы, а также наземные датчики электромагнитного импульса (ЭМИ). Некоторые из этих методов имеют возможность обнаружения характерной ядерной сигнатуры от испытания малой мощности. Однако, такие системы весьма навязчивы, и в некоторых случаях в поле зрения датчиков не должно быть препятствий на расстояниях порядка метров от места любой подозрительной деятельности. Сейсмические, радиохимические датчики, и датчики ЭМИ могут работать на больших расстояниях от любой контролируемой деятельности, но вероятность обнаружения и идентификации нелегальных испытаний уменьшается. Сейсмические датчики для проверки на месте обладают дополнительным недостатком (с точки зрения страны-хозяина), заключающимся в возможности обнаружения вибраций от соседней легальной, но секретной деятельности, не относящейся к ядерным испытаниям.

Дистанционные методы

В совокупности дистанционные методы наблюдений предоставляют широкие возможности обнаружения, однако каждый из методов существенно ограничен одной средой, в которой происходит детонация. Методы дистанционного обнаружения и идентификации в атмосфере или в космическом пространстве обладают большими возможностями, и обнаруживают ядерную сигнатуру в интервале от секунд до суток после взрыва. Пять из них (детекторы оптического, рентгеновского, нейтронного и гамма-излучения и датчики ЭМИ) предназначены для наблюдений мгновенного электромагнитного и нейтронного излучения, тогда как радиохимические методы регистрируют долгоживущие радиоактивные продукты взрыва.

Напротив, пять дистанционных методов обнаружения подводных и подземных ядерных испытаний (радиохимические, инфразвуковые, гидроакустические, и спутниковые телевизионные) менее надежны. Только радиохимические методы могут показать характерную ядерную сигнатуру от ядерного взрыва, и только тогда, когда произойдет случайный выброс продуктов взрыва в атмосферу. Четыре других метода могут обнаружить различные эффекты от взрывной волны, но не прямые эффекты ядерного излучения. Следовательно, используя тактические обходные методы, такие, как развязку, более глубокое захоронение, маскировку, скрывание, и обман, может оказаться возможным провести ядерные взрывы малой мощности под землей таким образом, чтобы они либо полностью избежали обнаружения, или были неверно отождествлены с неядерными явлениями, такими, как землетрясения⁵.

С точки зрения верификации, неверная классификация сейсмических событий является особенно неприятной. Только за последние десять лет произошло три документированных случая, когда природные землетрясения были неверно отождествлены с ядерными взрывами. Два из них произошли в январе и августе вблизи российского полигона для ядер-

⁴ ДВЗЯИ включает положения об инспекции на месте после события, которые могут предусматривать использование оборудования со специальными датчиками, которое иногда называют «методами проверок на месте». Использование такого оборудования предназначено для разрешения неоднозначных событий, обнаруженных другими системами (например, системами дистанционного наблюдения). В этой статье мы используем термин «методы проверки на месте» в более общем смысле для обозначения *любого* датчика, расположенного на небольшом расстоянии от подозреваемой испытательной площадки с целью регистрации сигнала от ядерного события. Поскольку в ДВЗЯИ не содержится положений о мониторинге с этим широким классом приборов, разрешение на их применение должно даваться отдельными двусторонними соглашениями.

⁵ Учитывая эти технические ограничения современной системы международного мониторинга, для сбора сведений о неоднозначных или подозрительных событиях следует опираться на инспекции на месте (ИНМ).

ных испытаний на Новой Земле⁶. В дополнение к случайному появлению ложных положительных результатов, здесь имеется постоянная проблема ложных отрицательных результатов – классификация подземных ядерных взрывов малой мощности как безобидных событий⁷. Хотя сейсмические датчики имеют наибольшие шансы обнаружения подземных испытаний малой мощности, относительно слабый сигнал ($m_b \approx 2,0 - 3,0$) не является специфически ядерным и может оказаться одним из тысячи ожидаемых неоднозначных сейсмических сигналов, ежегодно генерируемых землетрясениями во всем мире⁸. В результате редкое событие тайного подземного ядерного испытания может потеряться в шуме.

Проблемы неоднозначных сигналов в системах дистанционного сейсмического мониторинга и навязчивость современных методов инспекции на месте ставят вопрос о том, могут ли другие датчики дать полезную дополнительную информацию. В следующем разделе мы рассмотрим, как детекторы антинейтрино могут вписаться в существующую систему верификации.

Применение детекторов антинейтрино для верификации

Во многих отношениях, всплеск антинейтрино, сопровождающий каждый ядерный взрыв, является идеальным сигналом ядерной детонации. В каждом ядерном взрыве образуется большое количество нейтрино – при ядерном β -распаде продуктов деления образуется около 10^{24} нейтрино на 1 кт энерговыделения при делении во временном интервале около 10 секунд. Они изотропно удаляются от источника со скоростью света. Всплеск образующихся антинейтрино уникален – ни один другой источник не производит всплеска антинейтрино такой интенсивности и длительности в данном интервале энергий. Поскольку вещество вокруг ядерного устройства не влияет заметным образом на антинейтрино, сигнал не зависит от среды, в которой произошел взрыв. Напротив, в других системах датчиков следует исправлять вызванные средой искажения для того, чтобы восстановить исходный сигнал. В целом, антинейтрино являются единственным известным характерным ядерным сигналом, который распространяется на большие расстояния от подземных ядерных взрывов.

Только недавно стали серьезно рассматриваться детекторы, достаточно большие для того, чтобы представлять интерес для обнаружения антинейтрино от ядерного взрыва⁹. Например, крупнейший из современных детекторов нейтрино, Супер Камиоканде, имеет достаточный объем ($50\,000\text{ м}^3$), чтобы обнаружить всплеск из пяти антинейтрино от взрыва в 1 кт на расстоянии в 25 км. В следующих разделах мы рассмотрим возможные применения детекторов антинейтрино для локального и дистанционного мониторинга ядерных испытаний.

Применение детекторов антинейтрино для кооперативного мониторинга

Мониторинг субкритических испытаний. ДВЗЯИ запрещает ядерные взрывы вплоть до нулевой мощности. США и Россия объявили о своем намерении проводить «субкритические» испытания, в которых не создаются условия для экспоненциально нарастающей цеп-

⁶ Третий ложный положительный сигнал наблюдался в Пакистане 28 апреля 1991 г. Пакистанские ученые неверно предположили, что это событие было индийским ядерным испытанием. Gregory van der Vink and Terry Wallace, “The Political Sensitivity of Earthquake Locations”, IRIS Newsletter, (1996): 20 – 23. Gregory van der Vink and Terry Wallace, “Response to Comments by M. Henger, K. Koch, B. Ruud, and E. Husebye”, IRIS Newsletter, (1997); 16:2, 21 – 22.

⁷ Ранее сейсмологи неверно классифицировали испытательные ядерные взрывы как землетрясения. См. S. Arora and T. Basu, “A Source Discrimination Study of a Chinese Seismic Event of May 4, 1983”, Tectonophysics, (1984): 109, 241 – 251.

⁸ W.J. Hannon, «Seismic Verification of a Comprehensive Test Ban», Science, (1985): 227: 4684, 251 – 257.

⁹ См. ссылку [3].

ной реакции деления. Деятельность, связанную с такими испытаниями, очень трудно отличить от проводящейся в связи с ядерными испытаниями малой мощности. Проблема США и России состоит в том, чтобы показать, что эти объявленные субкритические испытания в действительности не являются надкритическими испытаниями малой мощности, и не используются для маскировки таких испытаний. В то же время, обе страны отказываются применять такие системы мониторинга, которые могли бы выявить секретную информацию. Поскольку разрешенная деятельность на испытательном полигоне обычно не сопровождается образованием антинейтрино¹⁰, а импульс антинейтрино является единственным характерным ядерным сигналом, который может быть надежно обнаружен за пределами полости для испытаний, детекторы антинейтрино, если это будет реализуемо, могут стать прекрасными средствами для мониторинга объявленной площадки для субкритических испытаний.

Снижение потребности в инспекциях на месте. Режим антинейтринного мониторинга на месте может также иметь значение для разрешения неоднозначных случаев, которые могут представляться ядерными взрывами с мощностью много большей нескольких килограммов или даже нескольких тонн. ДВЗЯИ разрешает инспекции на месте для разрешения сомнительных случаев, но такие инспекции не могут быть проведены немедленно, требуют политического процесса для своего разрешения, и могут быть весьма навязчивыми даже на очень большой площади (до 1000 км²). Ненавязчивый режим локального мониторинга может значительно уменьшить вероятность того, что от страны-хозяина потребуют принять такую навязчивую, и даже поверхностную, инспекцию верификации ДВЗЯИ внутри области действия детектора. Например, детектор с радиусом действия в 100 км будет способен наблюдать за большинством из существующих полигонов для ядерных испытаний (см. рис. 1). Такой детектор значительно сократит опасения того, что ядерные взрывы уровня нескольких килотонн с сейсмической развязкой, произведенные на этих полигонах, не будут замечены всемирной сейсмической сетью, и уменьшит необходимость в навязчивых инспекциях. Дополнительным преимуществом является то, что детектор, способный обнаружить антинейтрино от взрыва в 1 кт на расстоянии в 100 км, сможет обнаружить взрыв мощностью в несколько килограммов на расстоянии в 100 м.

Вообще говоря, локальная система мониторинга позволит укрепить доверие и сократить непонимание такого вида, которое было вызвано сейсмическими событиями 1996 г. на Новой Земле. Режим локального мониторинга может быть создан либо в рамках ДВЗЯИ, либо по отдельным соглашениям.

Применение дистанционных детекторов. Из-за трудности извлечения информации о направлении из сигнала антинейтрино, детекторы с большим радиусом действия должны использоваться совместно с другими методами, которые способны дать более конкретную информацию о положении. При подобном применении детектор антинейтрино может показать, что ядерный взрыв произошел в конкретный момент (с точностью до десятков секунд) и в определенной области от детектора, в то время как другие методы, такие, как сейсмическое обнаружение, могут обеспечить более точную локализацию подозрительного события, происшедшего в этом временном интервале. Детекторы антинейтрино с большим радиусом действия, работающие вместе с детекторами, основанными на других физических принципах (в основном, сейсмическими), могут значительно упростить проблему сейсмической развязки, уменьшить количество ложных сигналов тревоги, и увеличить вероятность успешного и убедительного определения свойств события. Детекторы антинейтрино способны также дать дополнительные данные о мощности взрыва и, возможно, об отношении энерговыделения в синтезе и делении.

¹⁰ Импульсные реакторы могут генерировать слабые всплески антинейтрино в различных временных масштабах.

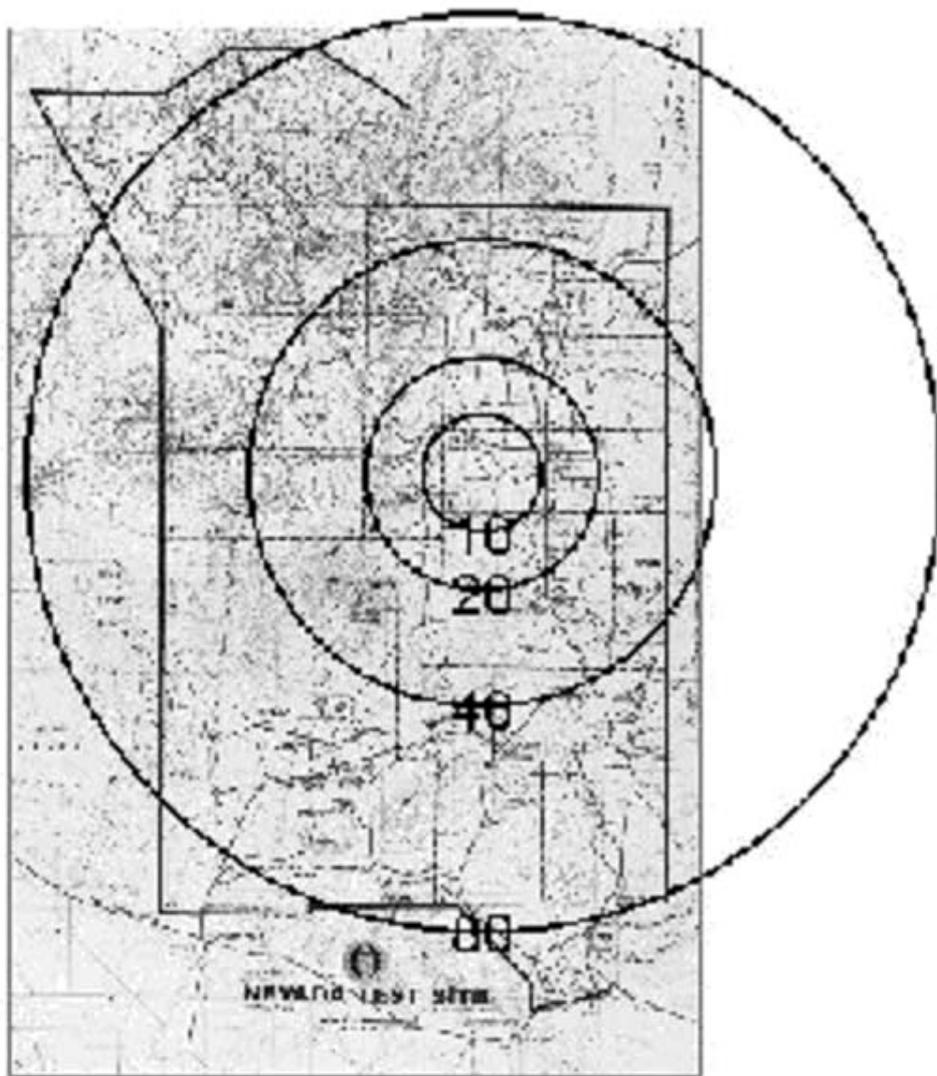


Рис.1
Испытательный полигон в Неваде
с радиусами дальности в 10, 20, 40 и 80 км.

Идеальный детектор должен обладать радиусом действия, по меньшей мере равным диаметру Земли (12 800 км) для взрыва в 1 кт. Однако, детекторы с меньшим радиусом действия также могут быть полезными. Например, детектор с радиусом действия в 3000 км для взрыва в 1 кт, расположенный в Гренландии, способен обнаружить взрыв в 1 кт на Новой Земле, или взрыв примерно в 10 кт в любой точке на земном шаре.

Методы обнаружения всплеска антинейтрино

Малая вероятность взаимодействия антинейтрино накладывает два общих требования: либо поток антинейтрино должен быть высоким, либо объем детектора должен быть большим. Для обеспечения высокого потока детектор должен быть расположен как можно ближе к месту взрыва. Если политические и практические ограничения не допускают этого, то нужно увеличивать объем детектора. В предельном случае диаметра Земли (12 800 км) даже чувствительность в 5 событий на взрыв в 1 кт потребует детектора с объемом, эквивалентным кубу со стороной в 2,3 км.

В следующих разделах мы определим характеристики события, и размеры, состав и удаленность детекторов, чувствительных к ядерным взрывам с мощностью в 1 кт или ниже.

*Характеристики антинейтринно деления*¹¹. В среднем при ядерном взрыве образуется около 5 – 6 антинейтринно на деление. Полное количество прямо пропорционально мощности взрыва:

$$N_{\bar{\nu}} = 6N_{fiss} Y \quad (1)$$

где Y - мощность в кт, а $N_{fiss} = 1,45 \cdot 10^{25}$ – количество делений в расчете на одну килотонну. Всплеск продолжается примерно 10 секунд, а энергия антинейтринно достигает 8 МэВ¹².

Взаимодействие антинейтринно с протонами. Протонные мишени хорошо приспособлены для обнаружения антинейтринно с энергиями порядка МэВ из-за относительно высокой вероятности и низкого порога неупругого взаимодействия. Как видно из уравнения (2), антинейтринно преобразует протон (p) в нейтрон (n) и позитрон (e^+):



Пороговая энергия этого взаимодействия равна

$$(m_n - m_p) + m_{e^+} = 1,8 \text{ МэВ} \quad (3)$$

где m_n , m_p , m_e – массы нейтрона, протона и позитрона соответственно.

Для регистрации антинейтринно с энергией порядка МэВ в реальном времени чаще всего используются два материала мишени: вода и жидкий сцинтиллятор. Последний более предпочтителен в смысле чувствительности и энергетического разрешения, но слишком дорог и непрактичен для детекторов, содержащих более нескольких тысяч тонн вещества¹³.

Энергетический спектр антинейтринно, образующихся при делении ^{239}Pu и ^{235}U , усредненный по сечению реакции антинейтринно с протоном, показан на рис. 2. Спектр излучаемых позитронов имеет такую же форму, но смещен в область меньших энергий на 1,8 МэВ.

Количество взаимодействий в детекторе всплесков антинейтринно деления. Размер детектора определяется из требования минимального количества взаимодействий антинейтринно. Уравнение (4), определенное в работе¹⁴, связывает количество взаимодействий от взрыва с энерговыделением в реакциях деления в Y кт, объемом V в кубических метрах, и расстоянием от места взрыва до детектора r в метрах. Коэффициент α (выраженный в $(\text{кт})^{-1} \text{м}^{-1}$) зависит от плотности вещества детектора, как показано в табл. 1.

$$N_{\text{int}} = \frac{\alpha Y V}{r^2} \quad (4)$$

¹¹ В ссылке [14] сигнал описан более детально.

¹² Другие методы обнаружения, которые основаны на радиохимическом преобразовании ядер нейтринно, обладают длительностью циклов, которая слишком велика для того, чтобы быть полезной для обнаружения ядерных взрывов в реальном времени.

¹³ Мы принимаем пять взаимодействий как минимальное значение для обнаружения двух событий с вероятностью в 96%.

¹⁴ Adam Bernstein, Todd West, Vipin Gupta, "An Assessment of Antineutrino Detection as a Tool for Monitoring Nuclear Explosions", SAND99-8497 (Livermore CA: Sandia National Laboratories, June 1999), 13. В этой расширенной версии данной статьи содержится больше сведений о фоне и конструкции детектора.

Табл. 1. Постоянная α в уравнении (4).

Среда	Вода	Лед	Сцинтиллятор
$\alpha \cdot 10^4$	5,4	5,0	4,24

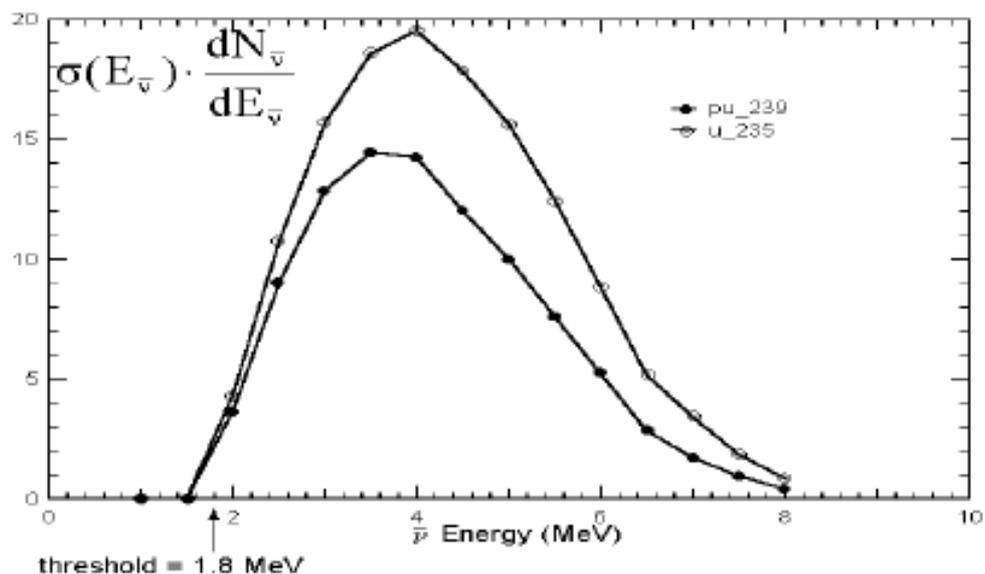


Рис. 2

Энергетический спектр антинейтрино, образующихся при делении ^{239}Pu и ^{235}U , усредненный по сечению реакции антинейтрино с протоном. Порог реакции равен 1,8 МэВ.

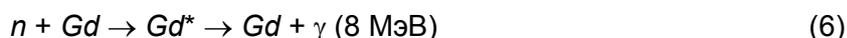
Уравнение (4) может быть применено для расчета приблизительных размеров детектора, пригодного для использования на различных расстояниях при постоянных мощности взрыва и количестве взаимодействий антинейтрино с протоном. Чтобы дать грубое представление о требуемых масштабах, отметим, что объем, необходимый для регистрации хотя двух антинейтрино с вероятностью 96% от ядерного взрыва в 1 кт на расстоянии в 1000 км, равен примерно 420 кубометров¹⁴.

Регистрация антинейтрино в жидком сцинтилляторе. Согласно выражению (2), антинейтрино, взаимодействующие с протоном в жидком сцинтилляторе, образуют позитрон и нейтрон. Позитрон выделяет всю свою энергию в объеме сцинтиллятора, давая мгновенный сцинтилляционный сигнал. Нейтрон будет захвачен в протонных мишенях в среднем через 150 мксек (в зависимости от концентрации протонов в сцинтилляторе) в результате взаимодействия:



Фотон производит наблюдаемую энергию ионизации в результате комптоновского рассеяния в жидком сцинтилляторе.

Сигнал от нейтронов может быть значительно усилен, а время захвата сокращено, при использовании добавок с большим сечением захвата тепловых нейтронов. Выражение (6) показывает взаимодействие для гадолиния¹⁵:



¹⁵ Сечение захвата нейтронов у гадолиния составляет 49 000 барн, по сравнению с 0,328 барн у водорода.

(* означает возбужденное ядро). Нейтрон поглощается через 30 мксек после рождения, образуя возбужденное ядро Gd, высвобождающее несколько МэВ в гамма-лучах. Точное время задержки и энергосвободное выделение зависят от элемента и концентрации, изменявшейся в проведенных экспериментах от 0,1 до 2,5%.

Фотоумножители регистрируют видимое излучение, образующееся при ионизации жидкого сцинтиллятора позитронами и гамма-лучами от нейтронного захвата. Световой выход высок: тысячи фотонов на 1 МэВ поглощенной энергии. Высокий световой выход сцинтиллятора и резкая временная корреляция сигналов от нейтрона и позитрона позволяют эффективно подавлять фон, даже для антинейтринно сравнительно малой энергии, образующихся при делении.

Пример детектора всплесков от деления на базе жидкого сцинтиллятора. Здесь мы используем проектные параметры и оценки фона для 1000-тонного детектора КамЛАНД с жидким сцинтиллятором, строящегося в настоящее время в шахте в Японии¹⁶. Этот тип детектора предназначен для регистрации антинейтринно деления (от реакторов) с энергиями в том же диапазоне, которые характерны для ядерного взрыва. Самый большой из действующих в настоящее время детекторов с жидким сцинтиллятором (LVD – детектор большого объема) с массой 1600 тонн работает в лаборатории Гран Сассо в Италии¹⁷.

В детекторе КамЛАНД видимое сцинтилляционное излучение, образующееся при захвате позитрона и нейтрона, регистрируется 1300 фотоумножителями. События отбираются по величине энергосвободного выделение позитрона и нейтрона, и по пространственному и временному совпадению между позитроном и нейтроном.

Фон в детекторах типа КамЛАНД образуется под действием космических лучей, земной радиоактивности, сверхновых и реакторов. Детальное обсуждение этого фона приведено в работе¹⁴. На глубине в 50 метров водного эквивалента (м.в.э.) общий фон от всех источников для характеристик детектора КамЛАНД и его критериев отбора составляет примерно 80 событий в сутки. Эта величина уменьшается до 0,028 событий в сутки на реальной глубине КамЛАНД в 2700 м.в.э.

Определение количества событий, размеров детектора и расстояния от детектора до испытания

Объем детектора может быть определен непосредственно из уравнения (4), если известны мощность взрыва и количество событий в сигнале. Оптимальное минимальное количество событий в сигнале может быть определено в предположении, что фон распределен по Пуассону, и что скорость появления ложных положительных событий не будет превышать одного в столетие (снижение этого строго критерия до одного события в год окажет небольшое влияние на минимально требуемую величину сигнала). В приведенных ниже расчетах используется оценка полного фона для детектора на глубине в 50 м.в.э. для 10-секундного интервала. В табл. 2 показано количество событий, требуемое от детектора размера КамЛАНД (1000 тонн), и для набора из пяти таких детекторов (общая масса 5000 тонн), а также расстояние, на котором детектор такого размера будет чувствителен к такому количеству событий. Требуемое количество событий было исправлено для учета ожидаемой чувствительности детектора в 20%. Радиус действия для большой системы детекторов в 5000 тонн может быть увеличена до 6,5 км при эффективности обнаружения сигнала в 100%. Понижение критерия до разрешения одного ложного положительного события в год сократит количество требуемых событий для детектора в 1000 (5000) тонн до 15 (20), что приведет только к небольшому увеличению максимального радиуса чувствительности для взрывов в 1 кт.

В целом, детекторы с жидким сцинтиллятором, работающие на глубине в несколько десятков метров ниже земной поверхности, с размерами и характеристиками, подобным существующим детекторам, смогут обнаружить взрывы в 1 кт на расстоянии в несколько километров.

¹⁶ Параметры детектора взяты из F. Suekane, "Status of the KamLAND Experiment", talk presented at Europhysics Neutrino Oscillation Workshop, (Nov'98) 7 – 9 September 1998, Amsterdam, the Netherlands.

¹⁷ <http://www.lngs.infn.it/lngs/htexts/lvd>

Табл. 2. Количество исходных взаимодействий антинейтрино, необходимых для гарантированного отсутствия более, чем одного ложного положительного события в столетие. Кроме того, приводится расстояние от ядерного испытания в 1 кт, на котором эта масса сцинтиллятора будет чувствительна к указанному количеству событий, в соответствии с уравнением (4). Оценка фона соответствует глубине в 50 м.в.э.

Масса детектора (в тоннах)	N_{100}	R_1 (в км)
1000	20	1,5
5000	25	3

N_{100} - количество исходных взаимодействий антинейтрино, необходимых для гарантированного отсутствия более, чем одного ложного положительного события в столетие.
 R_1 – максимальное расстояние от ядерного испытания в 1 кт для обнаружения такого количества событий.

Регистрация нейтрино в H_2O

Предельная дальность для использования сцинтилляторов равна нескольким километрам из-за высокой стоимости и воздействия на окружающую среду огромных количеств сцинтиллятора, требующихся для больших дальностей. За этим пределом вода, вероятно, остается наиболее подходящей средой, несмотря на свою меньшую чувствительность.

Из-за того, что в H_2O сигнал нейтрона обычно не измеряется, пространственная и временная корреляция сигналов нейтрона и позитрона не может быть использована для подавления фона. В результате уровень фона повышается и соответствует любым событиям, похожим на сигналы от позитронов с энергией в несколько МэВ. Из-за высокого фона водные черенковские детекторы до сих пор были ограничены регистрацией нейтрино с энергией, примерно превышающей порог в 5 МэВ. Этот порог трудно понизить, как того требует регистрация всплеска нейтрино от делений.

Регистрация всплеска нейтрино в H_2O . Водные детекторы измеряют черенковское излучение позитрона, родившегося в процессе обратного бета-распада (уравнение (2)). Позитрон с характерной энергией около 2 МэВ образует в H_2O примерно 270 фотонов с длиной волны от 350 до 550 нм¹⁸, которые могут быть зарегистрированы фотоумножителями¹⁹.

Как и раньше, размеры детектора определяются из указанных мощности взрыва, дальности и желаемого количества событий. В идеальном случае количество событий должно быть оптимальной функцией фона. Мы установим количество событий равным 10, достаточно большим для того, чтобы всплеск было трудно имитировать флуктуациями фона, но достаточно малым, чтобы уменьшить требуемое количество модулей.

Проектные соображения и размер системы. Из-за малого числа фотонов, образующегося при всплеске, для эффективного извлечения сигнала требуется большое количество фотоумножителей и как можно более герметичный детектор. С точки зрения простоты и эффективности мы рассмотрим сферическую решетку фотоумножителей, окружающих центральный объем воды.

Радиус сферы ограничивается необходимостью сокращения разброса времен прихода фотонов на фотоумножители и влиянием поглощения света. В очищенной воде длина поглощения синего черенковского излучения примерно равна 60 м. Поэтому существенно большие радиусы детектора приведут к неприемлемой потере сигнала. В последующем анализе мы будем использовать модули общим диаметром в 50 м, в которых события будут приниматься из внутренней сферы диаметром 45 м, что соответствует временному окну в 200 нс для сбора света с фотоумножителей²⁰. Общее количество воды в сферическом модуле диаметром 50 м равно 65 550 т (47 712 т во внутреннем модуле диаметром 45 м). Это

¹⁸ Мы пренебрегаем небольшим количеством черенковского излучения, образующегося при комптоновском рассеянии фотонов от аннигиляции позитронов.

¹⁹ Черенковское излучение представляет собой когерентную электромагнитную ударную волну, возникающую при движении заряженной частицы в среде со скоростью, превышающей скорость света в среде.

²⁰ Для дальности в 10 км диаметр модуля в 40 м несколько меньше.

сравнимо с общей массой детектора Супер Камиоканде (50 000 тонн), самого большого из построенных до сих пор черенковского детектора с очищенной водой.

Радиус действия модуля диаметром 50 м для взрыва в 1 кт равен только нескольким десяткам километров, в зависимости от требуемого количества событий в сигнале. Для достижения большей дальности мы должны использовать большее количество модулей. Мы определяем сигнал на больших расстояниях как одиночное антинейтринное событие, если в каждом наборе модулей в системе все сигналы были приняты в течение 10 секунд.

Предполагая покрытие детектора фотоумножителями в 50%, типичный позитрон с энергией около 2 МэВ вызовет срабатывание в среднем у 25 фотоумножителей. У существующих детекторов покрытие составляет около 40%.

Принимая такую статистику фотонов и геометрию, мы можем оценить количество модулей и фотоумножителей, необходимое для обнаружения взрыва в 1 кт на разных расстояниях. Допустимый уровень шума определяется из требования частоты ложных положительных сигналов не более одного раза в столетие. Для обеспечения разумного количества фотонов мы будем считать минимальную энергию позитрона равной 2,0 МэВ, что приведет к потере сигнала примерно в 38%. Для компенсации этой потери объем детектора увеличивается.

В табл. 3 показано количество модулей, количество фотоумножителей в модуле, и полное количество фотоумножителей в зависимости от радиуса действия детектора. Для сравнения, в современном эксперименте по физике высоких энергий может использоваться до 10 000 фотоумножителей. Сокращение чисел, представленных в табл. 3, в два-три раза, может быть достигнуто за счет повышения эффективности фотокатода, или при помощи улучшенных методов светосбора, таких, как фокусирующие линзы.

Табл. 3. Количество модулей указанного размера, необходимое для регистрации всплеска из 10 событий от взрыва в 1 кт на указанном расстоянии. Кроме того, приводится количество фотоумножителей в модуле и общее количество фотоумножителей для каждого расстояния.

R	r	N_m	N_{pm}	N_{tpm}
10	20	1	12800	12800
100	22,5	63	16200	10^6
1000	22,5	6300	16200	10^8
12800	22,5	10^6	16200	10^{10}

R – дальность (расстояние от детектора до взрыва, в километрах); 12800 км – радиус Земли
r – радиус модуля (в метрах)
 N_m – количество модулей
 N_{pm} – количество фотоумножителей в модуле
 N_{tpm} – полное количество фотоумножителей

Ограничения по шуму модуля. На расстояниях в 100 км и выше, мы рассматриваем сигнал как одиночное антинейтринное событие в каждом из 10 детекторов во временном окне длительностью 10 секунд. Реальный фон всплесков, таких, как от сверхновых, низок, в то время как множественные события, производимые в каждом модуле мюонными ливнями, не удовлетворяют требованию многих модулей. Поэтому единственными вызывающими сомнения событиями будут случайные флуктуации уровня событий в нескольких модулях в 10-секундном временном окне.

В табл. 4 показаны уровни шума для модуля, которые обеспечивают появление флуктуаций на уровне 10 событий в любом 10-секундном временном интервале во всей системе не чаще одного раза в столетие. Сравнение этих уровней с различными оценками фона определяет ограничения, накладываемые на дальность, уровни загрязнения, и глубину заложения детекторов всплесков от деления. Понижение критерия до разрешения одного ложного положительного события в год окажет весьма небольшое влияние на допустимый уровень шума. Например, допустимый шум для 1000 км станет равным 1,1 события в день вместо 0,7.

Фон. Фон в водных детекторах без добавок велик из-за отсутствия нейтронного сигнала совпадений. Когда регистрируется только позитрон, фон состоит из любых событий,

регистрируемых по черенковскому излучению и выделяющим в детекторе энергию, большую 2 МэВ. На расстояниях, больших примерно 10 км, достижимые в настоящее время уровни радиочистоты для урана и тория в $10^{-15} - 10^{-16}$ г/г приводят к фону, значительно превышающему определенные здесь допустимые уровни. Для увеличения дальности до 100 – 1000 км потребуется сокращение уровня радиоактивных примесей на несколько порядков величины.

Табл. 4. Уровни фона в модуле, требуемые для чувствительности в 10 событий от испытания в 1 кт для водного детектора на указанном расстоянии, при ограничении не более одного ложного положительного результата за столетие.

Дальность (расстояние от детектора до взрыва), км	Уровень шума для модуля при частоте ложных результатов менее 1 за 100 лет, событий/день
10	5875
100	75
1000	0,7
12800	0,004

Добавки для повышения чувствительности

Фон можно будет существенно понизить, если можно будет одновременно с позитроном регистрировать нейтрон. Это можно сделать, используя добавки, сильно поглощающие нейтроны, такие, как гадолиний. Этот вариант рассматривался для тяжеловодного детектора СНО²¹, в котором в 1000 тонн D₂O растворялось 2,5 т NaCl. Такие добавки никогда не использовались с H₂O, или в рассматриваемых здесь масштабах. Преимущество выделения нейтронов состоит в том, что отбор событий смогут пройти только сравнительно редкие фоновые события с совпадением времени. Мы используем гадолиний в качестве примера из-за его большого сечения захвата нейтронов.

Длительность захвата и восстановление положения. Концентрация гадолиния в 0,1% в обычной воде дает среднее время нейтронного захвата в 24 мксек. Временное окно между позитронным и нейтронным сигналом в 100 мксек даст эффективность захвата нейтронов в 94%. После поглощения возбужденное ядро Gd распадается с испусканием 3 – 4 фотонов с полной энергией 8 МэВ. Порог обнаружения в 5 МэВ позволит определить этот сигнал с хорошей эффективностью. Для сравнения, измеренная эффективность детекторов с жидким сцинтиллятором с добавками на уровне 0,1% составляет 85 – 90% при пороге 6 МэВ²².

Как и в жидком сцинтилляторе, восстановление положения позволит определить объем локализации позитрона и нейтрона. Положение каждого события может быть восстановлено по различию времен прихода фотонов на разные фотоумножители. Экстраполяция разрешения точки в 0,5 м детектора Супер Камиоканде²³ к низким энергиям позволяет ожидать грубую оценку разрешения в 1 м по каждой координате для позитрона в 2 МэВ (25 сработавших фотоумножителей).

Сводка по фону в водных детекторах с добавками. Для расчета чувствительности в присутствии добавок нам требуются оценки трех составляющих фона, за исключением тех, которые были оценены для детекторов без добавок:

- некоррелированный фон, обусловленный наложением сигналов, похожих на нейтроны и протоны, в окне совпадений 100 мксек и в области локализации события;
- фоном реальных антинейтрино;

²¹ H.H. Chen, "The Sudbury Neutrino Observatory", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A264, (1988): 50.

²² H. de Kerret, et al., "Proposal to Search for Neutrino Vacuum Oscillations Using a 1 Km Baseline Reactor Neutrino Experiment", (1993), <http://www.hep.anl.gov/NDK/Hypertext/chooz.html>, 74.

²³ T. Yamaguchi, "Study of Solar Neutrinos at Kamiokande", Thesis, University of Tokyo, (April, 1998). <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/pub/index.html>, 75. Более детально экстраполяция рассматривается в ссылке [14].

- коррелированным фоном от быстрых нейтронов, которые термализуются после столкновений с протонами, имитирующими позитронные события.

Оценки скоростей счета приведены в работе¹⁴. Общая скорость счета фона от всех источников близка к 1 событию в день на модуль, в предположении о концентрации урана и тория в 10^{-16} г/г, а модули размещены на глубине 3000 м.в.э. Согласно табл. 4, это дает предельную дальность в 1000 км для испытания в 1 кт при чувствительности в 10 событий при помощи детектора с добавками. Даже если фон может быть уменьшен еще больше, останется фон от реакторов, который ограничит дальность величиной в 1200 км даже для абсолютно безфоновому детектора.

ВЫВОДЫ

Приведенный выше анализ показывает, что краткосрочные перспективы регистрации антинейтринно от испытаний мощностью в 1 кт ограничены, как для локального, так и для дистанционного применения. Перспективы в различных средах для разных дальностей приводятся ниже.

Детекторы с жидкими сцинтилляторами для проверки на месте

На расстоянии до нескольких километров от места испытаний возможные интересные применения таковы:

- кооперативный мониторинг ограниченной области на существующем полигоне для ядерных испытаний для взрывов в 1 кт;
- кооперативный мониторинг секретной площадки, объявленной страной-хозяином для уменьшения вероятности инспекций на месте для верификации ДВЗЯИ;
- подтверждения того, что субкритические испытания на деле не являются надкритическими взрывами малой мощности, или не используются для маскировки таких взрывов.

Существующие детекторы с жидкими сцинтилляторами, сооруженные на глубине в 50 м.в.э. (около 20 м грунта) под земной поверхностью, способны обнаружить испытания в 1 кт в нескольких километрах от источника и поэтому могут оказаться полезными для первых двух применений. Полезность такого детектора в конце концов зависит от компромисса между стоимостью и желанием сторон получить ненавязчивую систему локального ядерного мониторинга.

Мониторинг субкритических испытаний намного сложнее. Например, для регистрации 10 событий от испытания с энерговыделением в 5 кг на расстоянии в 100 м понадобится система из примерно 30 модулей водных детекторов с добавками по 50 000 тонн (т.е., 30 детекторов размером с Супер Камиоканде). Такие применения могут быть интересны только тогда, когда система детекторов была построена для других целей, таких, как физические исследования, или дистанционный мониторинг испытаний большей мощности.

Водные детекторы

Водные детекторы без добавок непригодны для использования на расстояниях больше нескольких километров из-за большого фона от внутренней радиоактивности. Добавки, позволяющие выявить нейтроны, могут помочь существенно понизить фон. Гадолиний слишком дорог (около 100 долларов за грамм) для применения в больших системах детекторов; детекторы с солями хлора будут менее дорогими.

Если использовать добавки, то обнаружение испытаний в 1 кт на расстояниях от 100 до 1000 км будет в основном ограничено тремя техническими трудностями. Во-первых, стоимость фотоумножителя в настоящее время составляет около 1000 долларов, а их количество, необходимое для дистанционного обнаружения, лежит в пределах от 10^5 до 10^9 или более. Эффективности сбора и регистрации, принятые в нашем исследовании за 50 и 20 процентов соответственно, могут быть увеличены не более в три раза в совокупности, с со-

ответствующим понижением стоимости. Вторая трудность связана с поддержанием радиочистоты. Современная технология способна достичь уровня очистки в 10^{-16} г/г, но количество обрабатываемой воды для дистанционного применения должно быть увеличено по крайней мере на два порядка величины. Третьей проблемой является требование глубокого захоронения для экранирования космического фона. При радиусе действия в 1000 км надо построить 6300 модулей на глубине в 1100 м под землей для достаточного экранирования. Примерами крупномасштабных проектов, сравнимых с требуемыми размерами, являются хранилища радиоактивных отходов. Например, хранилище Юкка Маунтин будет состоять из нескольких километров тоннелей диаметром 5 и 10 м на глубине около 300 м под землей.

При дальностях более 1000 км физическим ограничением является фон антинейтрино от реакторов. Даже если другого фона нет, то скорость счета в одиночном модуле от реакторов даже в самом удаленном районе мира будет составлять 0,5 события в день, что, при интерполяции данных из табл. 4, ограничивает значение дальности 1200 км для испытания в 1 кт. Этот предел можно увеличить, требуя количества событий в сигнале, большего 10. Однако, это потребует еще большего количества модулей.

Учитывая все эти факторы, наибольшая дальность, которая кажется возможной в будущем десятилетии, равна 100 км для испытания в 1 кт, для чего потребуется около 60 водных модулей по 50 000 т. Это в 60 раз больше самого крупного из действующих детекторов нейтрино. Короче говоря, хотя теоретически детекторы антинейтрино являются весьма привлекательными для верификации ДВЗЯИ, технические трудности, а в конце концов, и физические ограничения, серьезно препятствуют реальному применению. Наши результаты подытожены в табл. 5.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим за поддержку этой работы, предоставленную отделом исследований и разработок верификации ДВЗЯИ и центром международной безопасности национальной лаборатории Сандия в Альбукерке, и центром исследовательских систем и разработок национальной лаборатории Сандия в Ливерморе.

Мы хотим поблагодарить профессора Буфорда Прайса и доктора Курта Вошнага с физического факультета Калифорнийского университета в Беркли за их важную помощь в описании свойств детектора АМАНДА и других крупных детекторов антинейтрино.

Табл. 5. Применения и реализуемость регистрации антинейтрино от ядерного взрыва в 1 кт на различных расстояниях.

Дальность (1 кт, 10 событий)	Применения	Реализуемость
10 км	<p>Кооперативный мониторинг площадок в несколько квадратных километров на бывших испытательных полигонах.</p> <p>Кооперативный мониторинг для создания «зон исключения» для инспекций на месте.</p>	<p>Возможно с существующими детекторами с жидкими сцинтилляторами, построенными на глубинах в 50 м.в.э.</p>
100 км	<p>Обнаружение испытаний в 1 кт на всем испытательном полигоне.</p> <p>Кооперативный мониторинг субкритических испытаний вблизи системы детектора.</p> <p>Наблюдения мощных испытаний через границы.</p>	<p>На пределе современной технологии:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Нужно выделять нейтронный сигнал с помощью добавок. • Могут помочь дешевые фотоумножители (современный уровень шума фотоумножителей приемлем).
1000 км	<p>Наблюдения через границы. Слежение за целыми странами или интересными регионами.</p>	<p>Необходимо существенное улучшение современной технологии:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Фотоумножители меньшей стоимости. • Улучшение крупномасштабной очистки воды. • Выделение нейтронного сигнала. • Новые методы регистрации и способы понижения фона.
10000 км	<p>Дистанционный мониторинг испытаний в 1 кт.</p>	<p>Невозможен для данной схемы и количества событий из-за неустранимого фона от реакторов.</p>