

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ КОМПОНЕНТА КСЕНОНА-133 МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Михаэль Шеппнер и Волфанго Пластино

Радиоактивный ксенон является важным атмосферным «меченым атомом» для обнаружения подземных ядерных взрывов. Международная система мониторинга была разработана для того, чтобы предоставить всемирный непрерывный физический мониторинг и обнаружение ядерных взрывов; она включает 40 станций мониторинга инертных газов. Они постоянно берут образцы атмосферы для измерения концентрации радиоактивного ксенона. В данной работе проводится анализ того, насколько эффективно сеть станций способна обнаружить необычные концентрации ксенона-133 в атмосфере. Было промоделировано большое количество ядерных взрывов, равномерно распределенных в пространстве и времени, и была рассчитана частота обнаружения. Моделирование атмосферного переноса было использовано для расчета чувствительностей «источник – рецептор» для каждой станции мониторинга. Такой подход включает антропогенный фон радиоактивного ксенона, конкретные критерии обнаружения для станции, различные сценарии поверхностных и подповерхностных ядерных взрывов, и пространственно-временной анализ. Представлены рекомендации для улучшения возможности обнаружения.

Михаэль Шеппнер и Волфанго Пластино работают на физико-математическом факультете университета Рома Тре, Рим, Италия.

Михаэль Шеппнер работает также в Институте исследований мира и политики безопасности Гамбургского университета, Гамбург, Германия.

Волфанго Пластино работает также в национальном институте ядерной физики университета Рома Тре, Рим, Италия.

Почтовый адрес для корреспонденций: Michael Schoeppner, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08542, USA. E-mail: schoeppner@princeton.edu

Адрес электронной почты: schoeppner@princeton.edu

Статья получена 18 декабря 2013 года и принята к публикации 7 июля 2014 года.

ВВЕДЕНИЕ

Испытательные ядерные взрывы являются важным инструментом для государств в разработке новых типов или конфигураций ядерного оружия и в поддержке существующих арсеналов оружия, например в проверке эффектов старения. Кроме того, испытания ядерного оружия могут быть потенциально использованы государствами в политических целях, чтобы продемонстрировать свои ядерные и технические возможности. С другой стороны, можно представить, что государство собирается тайно испытать ядерное оружие, но не желает, чтобы мировая общественность узнала об этом. Таким образом, можно рассматривать три сценария: (а) открытое испытание, когда государство испытывает атомную бомбу и публично признает это, (б) секретное испытание, когда государство испытывает атомную бомбу и не признает этого, и (с) фальшивое испытание, когда государство производит обычный (химический) взрыв и утверждает, что этот взрыв был ядерным. Такие сценарии, наблюдаемые со стороны, необязательно могут быть различимыми. Истинная природа события должна быть независимо оценена не с политической, а с физической точки зрения, чтобы обеспечить прочную основу для принятия решений международным сообществом.

В 1996 году Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) был открыт для подписания международным сообществом. Согласно действующей редакции этот договор, как только он вступит в силу, запретит всем ратифицировавшим его государствам проводить ядерный взрыв или разрешать проводить ядерный взрыв под их контролем. Текст договора предусматривает, что он вступит в силу только тогда, когда

его ратифицируют все 44 страны, перечисленные в Приложении 2 к договору. Этими 44 странами являются те, которые имели доступ к ядерным технологиям в момент открытия договора для подписания. Восемью оставшимися странами из Приложение 2 государства, которые еще не ратифицировали договор, являются Соединенные Штаты, Китай, Израиль, Египет, Иран, Индия, Пакистан и Северная Корея. Иран, Индия, Пакистан и Северная Корея до сих пор не подписали договор ДВЗЯИ.

Надежная верификация ДВЗЯИ является важным фактором для его будущего успеха и международного признания. Событие с большим выделением энергии, подобное ядерному взрыву, различными способами взаимодействует с окружающей средой, будь то под землей, под водой, или в атмосфере, что раскрывает диапазоны возможностей для обнаружения.

Для того, чтобы обеспечить всеобъемлющий режим верификации, Подготовительная комиссия Организации ДВЗЯИ создает Международную систему мониторинга (МСМ). Ее задача состоит в глобальном непрерывном физическом мониторинге и обнаружении ядерных взрывов. МСМ отслеживает четыре физических явления: сейсмические, гидроакустические и инфразвуковые волны, а также концентрацию определенных радионуклидов в атмосфере. В отличие от трех технологий, основанных на формах волновых сигналов, мониторинг радионуклидов обладает уникальным потенциалом для предоставления эмпирических данных о ядерном характере события. На июль 2014 года 85 процентов станций МСМ находились в рабочем состоянии. Когда начнут работать все станции, МСМ будет состоять из 171 сейсмической, 11 гидроакустических и 60 инфразвуковых станций во всем мире. Радионуклидная составляющая по плану должна включать в себя 80 станций мониторинга, 40 из которых будет оснащено оборудованием для мониторинга и обнаружения инертных газов для того, чтобы непрерывно замерять концентрации четырех радиоактивных изотопов (и изомеров) ксенона в атмосфере, а именно ксенона-131m, ксенона-133, ксенона-133m и ксенона-135. Эта составляющая для регистрации радиоактивных инертных газов проектировалась таким образом, чтобы обеспечить оцененную в 90 процентов вероятность обнаружения в течение 10 суток после ядерного взрыва¹.

Режим верификации ДВЗЯИ включает, в дополнение к МСМ, консультации и разъяснения, инспекции на месте и меры укрепления доверия². Современное состояние подписей и верификаций, перечень государств в Приложении 2, местоположения станций мониторинга и их текущий статус можно найти в сети Интернет по адресу: www.ctbto.org/map.

Система мониторинга радионуклидов, включая ее компоненту инертных газов, базируется на обнаружении частиц или газов, выбрасываемых в атмосферу при событии, и переносимых господствующими ветрами до тех пор, пока они не достигнут станции мониторинга в разбавленной концентрации. В данной работе моделирование переноса в атмосфере применяется для оценки возможности компонента МСМ, регистрирующего ксенон-133, для успешного обнаружения ядерных взрывов во всем мире; кроме того, даются рекомендации по ее улучшению.

ОБНАРУЖЕНИЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ ОТ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Эти упомянутые выше четыре изотопа радиоактивного ксенона были выбраны из-за их характеристик, подходящих для мониторинга ядерных взрывов, в особенности подземных взрывов. Их выход при делении достаточно велик; их химическая инертность позволяет им просачиваться из подземных полостей в атмосферу без химического захвата окружающим грунтом; их периоды полураспада являются подходящими, то есть они не будут слишком большими, чтобы накопление в атмосфере не привело к повышенному фону, при котором обнаружение станет более трудным, и, с другой стороны, не будут слишком короткими, чтобы они не распались на пути к станции мониторинга; природный фон радиоактивного ксенона в атмосфере отсутствует, фон является исключительно антропогенным. Ксенон-133 хорошо приспособлен к мониторингу ядерных взрывов из-за того, что его суммарный выход при делении в урановых и плутониевых устройствах составляет 5 – 7 процентов (в зависимости от делящегося материала и энергии нейтрона), и его времени полураспада в 5,24 дня.

Для обнаружения излучения радиоактивного ксенона от ядерных взрывов следует принимать во внимание различные факторы. Выход при делении определяет, как много радиоактивного ксенона было произведено непосредственно в ходе процесса деления. Количество радиоактивного ксенона, выброшенного в атмосферу, сильно зависит от окружающей среды взрыва. После выброса газы будут транспортироваться и разбавляться в атмосфере. При прибытии на станцию мониторинга концентрация частиц должна быть выше минимально обнаружимой концентрации (МОК) детектора.

В данной работе мощность ядерных взрывов предполагалась относительно малой, поскольку сеть мониторинга направлена на обнаружение и определение положения взрыва мощностью в 1 килотонну (кт) в любой точке земного шара. В течение цепной ядерной реакции, происходящей во время такого взрыва, первоначально образуется примерно 10^{13} беккерелей (Бк) ксенона-133³. После трех часов активность достигает примерно 10^{15} Бк ксенона-133 из-за распада других родительских изотопов. Накопление ксенона-133 достигает максимума примерно в 10^{16} Бк между 1 днем и 1 неделей после события.

В случае подземного ядерного взрыва достигает поверхности и проникает в атмосферу только определенное количество газа. Согласно другим публикациям⁴, предполагаются утечки от 1 до 10 процентов максимальной активности. В предположении, что утечка происходит в некоторой точке, базой для последующих дальнейших вычислений будет утечка в 1 процент от максимальной активности, то есть 10^{14} Бк.

В рассматриваемом ниже моделировании переноса в атмосфере используется временное разрешение в 3 часа. Таким образом, для атмосферных взрывов предполагается выброс 10^{15} Бк/кт. Для дальнейшего акцентирования различных сценариев и для получения более ясного понимания влияния выброшенной активности на вероятность обнаружения выброс от атмосферных взрывов принимается равным 10^{16} Бк, то есть эквивалентным активности ядерного взрыва в 10 кт в течение 3 часов.

После того, как газы будут выброшены в воздух, они будут двигаться по различным траекториям, в соответствии с господствующими ветрами в атмосфере, что будет приводить к разбавлению концентрации и распространению по земному шару. Типичное расстояние между станциями мониторинга по порядку величины равно примерно 1000 км. Для таких расстояний типичное разбавление в атмосфере будет лежать в диапазоне от 10^{-14} до 10^{-18} м⁻³.⁵ Кроме того, абсолютная концентрация в атмосфере будет уменьшаться в течение переноса в атмосфере из-за радиоактивного распада.

Станции мониторинга инертных газов оборудованы либо гамма-спектрометрами высокого разрешения, либо детекторами совпадений бета-частиц и гамма-лучей. В гамма-спектрометрии высокого разрешения изотопы радиоактивного ксенона обнаруживаются и количественно определяются детектором из германия высокой частоты (HPGe) по их отличительным гамма-линиям. В системах совпадения бета-частиц и гамма-лучей трубка из пластического сцинтиллятора для регистрации бета-частиц окружена детектором гамма-лучей из NaI(Tl)⁶. Применение измерений по совпадениям значительно уменьшает фон. Для измерительных станций МСМ с системами гамма-спектрометрии высокого разрешения время анализа образца равно 24 часам, в то время как системы совпадений бета-частиц и гамма-лучей анализируют образец в течение 12 часов. Проектные характеристики МСМ предусматривали для ксенона-133 МОК в 1 мБк/м³. В зависимости от установленной системы может быть достигнуто значение МОК в 0,4 – 0,6 мБк/м³.⁷

В соответствии с ДВЗЯИ планируется использовать 40 станций мониторинга инертных газов. Однако, на июль 2014 года было определено всего 39 станций; 40-ую станцию предполагается разместить в Индии, но по этому поводу все еще ведутся переговоры. Пятнадцать из этих 39 станций уже сертифицированы для непрерывного получения данных; другие 15 установлены и работают, но ожидают сертификации; десять в настоящее время находятся на стадии планирования или установки. Однако, успешное обнаружение ксенона от ядерных взрывов зависит также от антропогенного атмосферного фона ксенона-133, который обсуждается в следующем разделе.

ИСТОЧНИКИ ФОНА КСЕНОНА-133

Как отмечалось ранее, четыре выбранных изотопа радиоактивного ксенона не имеют природных источников фона. Они создаются в значительных количествах в ядерных реакциях, таких, как деление тяжелых ядер, например, урана-235, или в таких ядерных реакциях, как (p,n) реакции⁸. Все четыре радиоактивных изотопа ксенона с большим выходом создаются в делении ядер, инициированном тепловыми (то есть, медленными) нейтронами. За исключением ксенона-131m, другие три изотопа также имеют значительные выходы, когда деление индуцируется нейтронами, образованными при делении (то есть, быстрыми нейтронами). Деление, индуцированное тепловыми нейтронами, является основной реакцией в ядерных реакторах, в то время как деление быстрыми нейтронами происходит в ядерных взрывах. Значительные выбросы выходят из установок для производства медицинских изотопов и атомных электростанций. Выбросы из исследовательских реакторов, заводов по переработке, больниц, судов и подводных лодок с ядерными двигателями, вносят свой вклад в глобальный фон в меньшей степени, но такие выбросы либо происходят слишком нерегулярно, либо в слишком малых количествах, чтобы принимать их во внимание⁹. Поэтому в последующем анализе при определении

влияния на компоненту МСМ ксенона-133 будут рассматриваться только выбросы из установок для производства медицинских изотопов и атомных электростанций.

Что касается выбросов ксенона-133, самыми сильными их источниками, очевидно, являются установки для производства медицинских изотопов с активностью $10^{11} - 10^{13}$ Бк/день. Однако, общее число таких установок во всем мире невелико; в этом бизнес-секторе общемировой спрос на медицинские изотопы удовлетворяется несколькими игроками. В данной работе использовались данные за 2010 календарный год, в котором учитывались пять действующих установок для производства медицинских изотопов. Они расположены в Сиднее (Австралия, $5 \cdot 10^{14}$ Бк/год), Флерсе (Бельгия, 10^{15} Бк/год), Чок-Ривер (Канада, 10^{16} Бк/год), Петтене (Нидерланды, $7 \cdot 10^{11}$ Бк/год) и Пелиндабе (Южная Африка, $4 \cdot 10^{15}$ Бк/год). Типичные величины их выбросов, усредненные за 1 год, были взяты из других публикаций¹⁰, трудов конференций¹¹, или частных сообщений¹².

Обычно выбросы ксенона-133 из действующих атомных электростанций намного меньше, чем выбросы из установок для производства медицинских изотопов, но общее количество атомных электростанций во всем мире намного больше. В 2007 году на 195 площадках действовало 439 энергетических реакторов. В основном они расположены в Юго-Восточной Азии, Европе и Северной Америке. Типичные выбросы из них в среднем составляют около 10^9 Бк/день. Средние годовые выбросы на каждой отдельной площадке атомной электростанции были измерены, рассчитаны или оценены¹³. Согласно данным из информационной системы по энергетическим реакторам (PRIS) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) общее количество действующих энергетических реакторов во всем мире с 2007 по 2010 год существенно не изменилось¹⁴. Для данной работы небольшое количество новых или выключенных реакторов не существенно из-за малых выбросов атомных электростанций по сравнению с выбросами из установок для производства медицинских изотопов. Фон характеризуется несколькими сильными источниками (установками для производства медицинских изотопов) и большим количеством слабых источников (атомных электростанций), где типичная установка для производства медицинских изотопов выбрасывает столько же радиоактивного ксенона в единицу времени, сколько все атомные электростанции, вместе взятые.

Для данной работы была составлена база данных действующих установок для производства медицинских изотопов и атомных электростанций с информацией о средних ежегодных выбросах ксенона-133, предполагаемых для каждой установки в 2010 году и местоположении на широтно-долготной сетке с разрешением в один градус. Как обсуждалось ранее, глобальное распределение установок, выбрасывающих ксенон-133, сильно сконцентрировано в Восточной Азии, Европе и Северной Америке, что приводит к гетерогенному фону концентрации ксенона-133. Этот фон зависит, в основном, от мощности выбросов с каждой установки, ее местоположения, и господствующих ветров и метеорологической обстановки. Таким образом, экспериментальный опыт показывает, что у каждой станции мониторинга инертных газов будет различная и флуктуирующая фоновая концентрация ксенона-133, зависящая от ее местоположения, метеорологической ситуации в текущий момент времени, и любых наветренных выбросов ксенона-133.

Фон от источников, подобных установкам для производства медицинских изотопов и атомных электростанциям, рассматривается как допустимый фон, в то время как вклад от ядерного взрыва рассматривается как необычная дополнительная концентрация, которая должна быть отождествлена. Специфический и флуктуирующий фон на каждой станции мониторинга затрудняет успешную идентификацию вклада от ядерного взрыва. Естественно, этого проще добиться на станциях с низким, или обычно отсутствующим фоном. Было доказано, что моделирование переноса в атмосфере является надежным и основным инструментом для понимания глобального фона радиоактивного ксенона.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА В АТМОСФЕРЕ

Вообще говоря, когда частицы выбрасываются в атмосферу, их траектории будут зависеть от движения воздушных масс и от других метеорологических явлений, таких, как выпадение осадков. По мере рассредоточения частиц их концентрация будет разбавляться. Если будут доступны метеорологические данные за определенный временной период в определенной области, то траектории частиц можно будет получить из моделирования переноса в атмосфере. Разбавление концентрации в атмосфере можно будет рассчитать, моделируя траектории большого количества частиц. В лагранжевой модели рассредоточения частиц Flexpart¹⁵ для моделирования траекторий частиц используется схема с нулевым ускорением, которая точна до первого порядка:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + v(X, t) \Delta t$$

Это уравнение используется в модели Flexpart для интегрирования уравнения траектории частицы с вектором скорости ветра $v = v_g + v_t + v_m$, состоящим из ветра масштаба сетки v_g , турбулентных флуктуаций ветра v_t и среднемасштабных флуктуаций ветра v_m . Результатом этих вычислений является отношение между источником и рецептором, которое называют чувствительностью «источник-рецептор»¹⁶. В случае одиночного источника, который излучает только в течение одного временного шага, общая концентрация c [Бк/м³] в рецепторе определяется эмиссией источника S [Бк], умноженной на чувствительность «источник-рецептор» M [м⁻³], которая может рассматриваться как коэффициент объемного разбавления:

$$c = MS$$

Для сценария с многими источниками и (или) выбросом в течение нескольких временных шагов общая концентрация c рассчитывается как сумма по всем источникам i и временным шагам t :

$$c = \sum_{i,t} MS$$

При использовании моделирования переноса в атмосфере для определения чувствительностей «источник-рецептор» в зависимости от времени и местоположения результаты сохраняются в матрице чувствительностей «источник-рецептор». Модель Flexpart может применяться как в прямом, так и в обратном режиме¹⁷. В случае моделирования в прямом режиме, то есть дисперсии из источника в окружающую среду для каждого временного шага моделирования все ненулевые концентрации записываются в матрице чувствительностей «источник-рецептор». В случае моделирования в обратном режиме, то есть определения всех вкладов за период измерений в фиксированном местоположении для каждого временного шага в матрице чувствительностей «источник-рецептор» сохраняются все ненулевые вклады в общую концентрацию.

Для расчета матриц чувствительностей «источник-рецептор» применялась модель Flexpart v8.23 вместе с метеорологическими данными Европейского центра среднесрочных предсказаний погоды (ECMWF). Тем не менее, матрица M может учитывать только те условия, которые включены в метеорологические данные, и локальная метеорологическая ситуация, которая не учитывается в моделировании, может привести к изменению сигналов¹⁸. Пространственное разрешение метеорологических данных составляет один градус широтно-долготной сетки и временное разрешение равно 3 часам; данные для этого анализа в 2010 году имели глобальное покрытие. В представленном исследовании модель Flexpart применялась в обратном режиме для определения матриц чувствительностей «источник-рецептор» для 39 станций регистрации инертных газов системы MCM. Такой сценарий выгоднее в смысле объема вычислений, поскольку в нем число рецепторов заметно меньше числа источников радиоактивного ксенона.

ПОКРЫТИЕ СЕТЬЮ СТАНЦИЙ РЕГИСТРАЦИИ КСЕНОНА-133

Назначение данного раздела состоит в том, чтобы наметить подход, используемый в дальнейшем для оценки возможностей компонента ксенон-133 международной системы мониторинга. Задача заключается в определении количественных характеристик эффективности системы для обнаружения необычных концентраций ксенона-133 в атмосфере.

До сих пор термин «покрытие сети» описывался как общая способность системы MCM обнаруживать ядерные испытания. В данной работе в моделирование включается только ксенон-133 как наиболее распространенный радиоактивный изотоп среди инертных газов. Ранее исследовалось пространственное распределение пороговых выбросов от ядерных взрывов, которые могут инициировать их обнаружение¹⁹. Поэтому было установлено новое определение покрытия сетью станций регистрации ксенона-133²⁰. Покрытие сети η определяется как процентная доля всех возможных ядерных взрывов, равномерно распределенных в глобальном пространстве и времени, которые успешно обнаруживаются системой MCM.

В последующем покрытие сети η_{133} обозначает покрытие для компонента ксенон-133 системы MCM. Точ-

ное и действительное значение этого числа может быть определено только с бесконечным числом испытательных ядерных взрывов в течение бесконечного времени. Здесь покрытие сети аппроксимируется моделированием множества n ядерных взрывов, равномерно распределенного в дискретном пространстве и времени. Для каждого гипотетического события проверяется, было ли инициировано обнаружение компонентом инертных газов системы МСМ, или не было. Общая доля успешно обнаруженных событий определяет покрытие сети:

$$\eta = \frac{n_{\text{detected}}}{n_{\text{detected}} + n_{\text{undetected}}}$$

При использовании моделирования для приближенного расчета покрытия сети будут применяться определенные граничные условия, так как результаты естественно зависят от выбранных параметров:

$$\eta_{\text{reality}} \approx \eta_{\text{simulated}}(x_1, x_2, \dots)$$

В дальнейшем эти параметры в рамках данного исследования будут идентифицированы и впоследствии определены. Во внимание будут приниматься следующие влияющие параметры:

- Распределение взрывов (пространственное и временное).
- Выбросы от взрывов.
- Глобальный фон от ожидаемых источников.
- Сеть мониторинга (количество и местоположение станций мониторинга).
- Критерий обнаружения.

Далее обсуждается выбор каждого параметра.

Распределение взрывов (пространственное и временное)

Желательно использовать однородное пространственное распределение гипотетических ядерных взрывов, где ни одна область априорно не выделяется по своей вероятности проведения ядерного испытания. Применяемое моделирование переноса в атмосфере проводится на широтно-долготной сетке с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Абсолютная длина градуса широты и долготы зависит от радиуса окружности на данной широте²¹. Принимая Землю за эллипсоид²², зависимость расстояния по дуге в один градус от широты ϕ можно будет записать как:

$$d_{\text{Lat}}(\phi) = \frac{\pi r_{\text{eq}}(1 - e^2)}{180(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{3}{2}}}$$

и

$$d_{\text{Lon}}(\phi) = \frac{\pi r_{\text{eq}} \cos \phi}{180(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}}$$

Широтная зависимость приводит к изменению абсолютной длины одного градуса широты всего лишь 1 процент, то есть от $d_{\text{Lat}}(0^\circ) = 110,57$ км до $d_{\text{Lat}}(90^\circ) = 111,69$ км. С другой стороны, абсолютная длина одного градуса долготы зависит от широты намного сильнее, то есть от $d_{\text{Lon}}(0^\circ) = 111,32$ км через $d_{\text{Lon}}(45^\circ) = 78,85$ км до $d_{\text{Lon}}(90^\circ) = 0$ км. Это означает, что если все точки сетки будут трактоваться одинаково, то пространственная частота ядерных взрывов будет увеличиваться от экватора к полюсам. Поэтому для параллелей, лежащих выше или ниже экватора, для гипотетических ядерных взрывов будет учитываться только определенная процентная доля долготных точек сетки

$$p(\phi) = \frac{\cos \phi}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}}$$

для того, чтобы сохранить однородно распределенное поле событий. Оставшиеся точки сетки будут равномерно распределены вдоль каждой параллели. Вместо $360 \times 179 = 64\,440$ точек сетки будет рассматриваться всего $\sum_{\phi} 360 p(\phi) = 41\,408$ точек, что позволит обеспечить приблизительно однородное пространственное распределение. Тем не менее, для обеспечения точности подлежащее моделирование переноса в атмосфере, которое использовалось для определения матриц чувствительностей «источник-рецептор» 39 станций, расчеты проводились на полной сетке.

При выборе определенного периода времени целесообразно использовать целый год (или несколько полных лет), чтобы сбалансировать сезонные вариации. Для модели с временным разрешением в 3 часа, длительностью в 1 год, 41 408 точками сетки рассматривается всего $365 \times 8 \times 41\,408 = 120\,911\,360$ гипотетических событий.

Выбросы от взрывов.

Как указывалось выше, в этом подходе для определения покрытия сети используется только ксенон-133. При моделировании выбросов от гипотетических ядерных взрывов выбирается именно этот изотоп из-за своего выхода при делении и времени полураспада. Кроме того, для него имеется наибольшее количество данных по известным выбросам от ожидаемых источников.

Для поверхностных взрывов предполагается, что максимальное количество радиоактивного ксенона от взрыва мощностью 10 кт выбрасывается в течение первого временного шага моделирования. Как обсуждалось выше, это означает, что источник с активностью $S = 10^{16}$ Бк моделируется выбросом, равномерно распределенным во одному временному интервалу, то есть, 3 часам. Подземные взрывы рассматриваются здесь как утечка в 1 процент от взрыва в 1 кт в течение первого временного интервала, то есть 10^{14} Бк в течение 3 часов. Такой выброс предполагается там, где возможны подземные взрывы, то есть, когда точка сетки расположена над сушей. Так, где поверхность суши отсутствует, взрыв предполагается подводным. Выброс инертного газа от подводного взрыва в 10 кт в атмосферу аппроксимируется выбросом в 10^{16} Бк в течение одного временного шага в предположении, что инертные газы будут беспрепятственно подниматься к поверхности. Для того, чтобы различать подводные и подземные события, использовалась маска суша/море, содержащая информацию о том, где находится каждая точка сетки, над сушей, или над водой.

Глобальный фон от ожидаемых источников.

Глобальный фон ксенона-133 характеризуется несколькими сильными источниками (установки для производства медицинских изотопов) и многими слабыми источниками (реакторы атомных электростанций). На первом этапе может оказаться полезным оценить покрытие сети в отсутствие любого фона, а на втором этапе включить фон. Второй этап может оказать важное влияние на выбор подходящего критерия обнаружения. Для фона 2010 года была использована ранее упомянутая база данных с пятью установками для производства медицинских изотопов и 195 атомными электростанциями.

Сеть мониторинга.

Текущий проект сети предусматривает 40 станций МСМ с оборудованием для мониторинга инертных газов. В настоящее время определены местоположения только 39 станций. Предполагается, что сороковая станция, RNХ35, будет расположена в Индии, но переговоры по этому поводу еще не закончены. Для определения покрытия сети рассматривалась современная сеть и известными местоположениями 39 станций.

Критерий обнаружения.

В отсутствие фона радиоактивного ксенона критерий обнаружения означает просто, что концентрация, появляющаяся на станции мониторинга, должна превышать минимально обнаруживаемую концентрацию MDC:

$$c_{ne} \geq MDC$$

В сценарии, включающем фон, общая концентрация в образце ксенона-133 рассматривается как состоящая из ожидаемого фона (c_{bg}) и возможной добавки от ядерного взрыва (c_{ne}):

$$C_{total} = c_{bg} + c_{ne}$$

Таким образом, необычно высокая общая концентрация может указывать на присутствие ксенона-133 от ядерного взрыва. Поскольку фон сильно изменяется от станции к станции, желательно применять критерий обнаружения, специфический для конкретной станции. Общая концентрация в любом конкретном образце будет считаться подозрительной, когда она будет превышать среднее значение фона c_{bg} более чем на одно стандартное отклонение (т.е., 1σ), что приводит к несмещенному, но, тем не менее, специфическому для конкретной станции критерию обнаружения:

$$c_{ne} \geq \sigma_{local}$$

Если вклад от ядерного взрыва будет больше, чем локальное стандартное отклонение, то он может считаться необычно высокой концентрацией, и, следовательно представлять интерес для дальнейшей тщательной проверки. В следующем разделе рассматривается, как определяется стандартное отклонение для каждой станции.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОНА КСЕНОНА-133 НА СТАНЦИЯХ МСМ

Для того, чтобы определить стандартные отклонения, надо было определить ожидаемый фон на каждой из 39 станций мониторинга радиоактивного ксенона. Поскольку некоторые станции все еще находятся на этапах проектирования, строительства, или еще не прошли сертификацию, непрерывные измерения в течение последних нескольких лет проводились всего на нескольких станциях. Поэтому основным средством определения глобального атмосферного фона является моделирование переноса в атмосфере. Оно применялось здесь в обратном режиме для расчета матриц чувствительностей «рецептор-источник» на 39 размещенных станциях мониторинга инертных газов. Для того, чтобы устранить сезонные вариации, моделирование проводилось для всего календарного 2010 года. С учетом времени измерений на станции в 12 или 24 часа, всего было проведено приблизительно 22 000 моделирований, на каждое из которых уходило около 4 часов времени процессора. Рассчитанные матрицы чувствительностей «рецептор-источник» свертывались с распределением выбросов ожидаемых источников фона для того, чтобы определить зависящие от времени фоновые концентрации ксенона-133 на каждой станции.

Маловероятно, что данные о концентрациях ксенона-133 на одной станции будут подчиняться нормальному распределению, и поэтому надо было определить тип математического распределения. Это было необходимо для вывода согласованного стандартного отклонения. Анализировались следующие типы распределений: бета, Берра (известное также как Сингха-Маддала), обобщенного Парето, обобщенного гамма, обратного гауссовского, Кумарасвами, логарифмически-нормального, логарифмического Пирсона III, Пирсона, Пирсона VI, Уэйбулла, и Уэйбулла III.

Данные моделирования для каждой станции подгонялись к этим распределениям и результаты проверялись с помощью критерия Колмогорова-Смирнова, критерия Андерсона-Дарлинга, и критерия «хи-квадрат» Пирсона. Распределения ранжировались по точности подгонки в соответствии с этими тремя тестами. Выбиралось одно распределение с наилучшим средним рангом. После определения типа распределения проводился расчет стандартного отклонения.

Результаты показали, что стандартное отклонение, превышающее минимально обнаружимую концентрацию, наблюдается только на нескольких станциях, близких к установкам для производства медицинских изотопов или атомным электростанциям. Моделированные временные ряды сравнивались с доступными экспериментальными данными, и они показали хорошее согласие для регионов Северной Америки, Европы и Океании, и заниженную оценку для региона Восточной Азии²³. Примененная модель переноса в атмосфере Flexpart дает результаты с небольшим смещением, или вообще без него²⁴. Поэтому возможной и правдоподобной причиной такого расхождения является недооценка региональных выбросов²⁵.

ОБЗОР И АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ

Были разработаны три базовых сценария с параметрами выбросов от ядерных взрывов и от источников фона: (1) поверхностные взрывы без фона; (2) подповерхностные взрывы без фона; и (3) подповерхностные взрывы с фоном²⁶. Поэтапный переход от базового сценария к более реалистичному позволяет обсуждать изменения от сценария к сценарию и позволяет понять влияние различных параметров. Для каждого сценария покрытие сети рассчитывались на суточной основе и потом усреднялись за один год. Для последующего анализа отдельно сохранялось пространственное распределение.

Первый сценарий с поверхностными взрывами включает выбросы от ядерных взрывов с полным выбросом ксенона-133 в атмосферу в течение первого временного интервала в 3 часа. Из-за предполагаемого отсутствия фона критерий обнаружения для успешной регистрации предписывает, чтобы концентрация $c_{не}$ превышала локальную минимально обнаруживаемую концентрацию.

Исторически поверхностные ядерные взрывы дважды были применены в военных действиях, 6 августа 1945 года в Хиросиме и 9 августа 1945 года в Нагасаки, и многократно проводились во время испытаний. Соединенные Штаты, Советский Союз и Великобритания прекратили атмосферные испытания, когда в октябре 1963 года вошел в силу Договор о частичном запрещении ядерных испытаний; Франция и Китай прекратили испытания в 1974 и 1980 годах соответственно, не подписывая однако данного договора. Кроме того, можно представить себе мирные ядерные взрывы с полным или высоким выбросом в атмосферу, например, для земляных работ.

Этот сценарий приводит к среднему покрытию сети $n_{atmo} = (85,8 \pm 3,5)$ процента. В моделируемом 2010 году весенний сезон характеризовался низкими значениями глобального покрытия, а летний сезон – высокими значениями глобального покрытия. Минимальное значение глобального покрытия равнялось 78,3 процента, а максимальное – 92,8 процента. Это означает, что в данном сценарии целевая возможность обнаружения 90 процентов ядерных взрывов не всегда может быть достигнута. В моделировании 2010 года эта целевая возможность достигалась только летом в течение определенных коротких промежутков времени. Однако, такое сравнение отражает общую величину, усредненную по всем местоположениям и временным интервалам. Статистика сильно изменяется в определенных местоположениях или в определенных регионах, например, события с местоположением, близким к станции мониторинга, и находящиеся против ветра, будут регистрироваться чаще, чем удаленные события. Пространственное распределение для данного сценария показано на рисунке 1а.

Метеорологическая обстановка вблизи экватора играет важную роль в возможности обнаружения. Пассатные ветры переносят воздушные массы с южных и северных широт к экватору; ячейки Хэдли удерживают воздушные массы, захваченные в петлях между экватором и параллелями с широтой ± 30 градусов. Междутропическая зона конвергенции²⁷ (МТЗК) – это пояс низкого давления шириной в несколько сотен километров вблизи экватора, в котором сталкиваются пассатные ветры. Это приводит к образованию зон с низкими скоростями ветра или даже безветренных областей. В этих областях перенос воздуха к станциям мониторинга существенно ограничен. На широтах более ± 30 градусов вероятность обнаружения заметно выше и распределена более однородно. Влияние такой метеорологической обстановки, в особенности в экваториальной области, можно увидеть на рисунке 1а; ее можно идентифицировать как главную причину понижения общего покрытия сети в этом базовом сценарии.

Во втором сценарии подповерхностные ядерные взрывы, подземные и подводные, анализируются в отсутствии фона радиоактивного ксенона. Наиболее вероятно, что подповерхностные ядерные взрывы, будь то подземные или подводные, будут военными испытаниями. Как отмечалось ранее, подземные ядерные взрывы рассматриваются как утечки в 1 процент при мощности в 1 кт в течение одного временного интервала, в то же время, как отмечалось ранее, для подводных взрывов предполагается мощность в 10 кт и полный выброс. Однако, подводные испытания исторически были редкими, и их, скорее всего, будут обнаруживать станции гидроакустического компонента системы мониторинга, но радиационное подтверждение такого события входит в задачи компонента радионуклидов и инертных газов. Для успешного обнаружения концентрация $c_{не}$ должна превышать локальную минимально обнаруживаемую концентрацию. В данном сценарии усредненное по каждому дню покрытие сети равно $n_{subs} = (77,9 \pm 2,8)$ процента. Это означает, что перемещение ядерных взрывов с поверхности под поверхность уменьшает теоретическое покрытие сети в среднем на 7,9 процента. Суточные значения включают минимум в 71,5 процента и максимум в 84,0 процента.

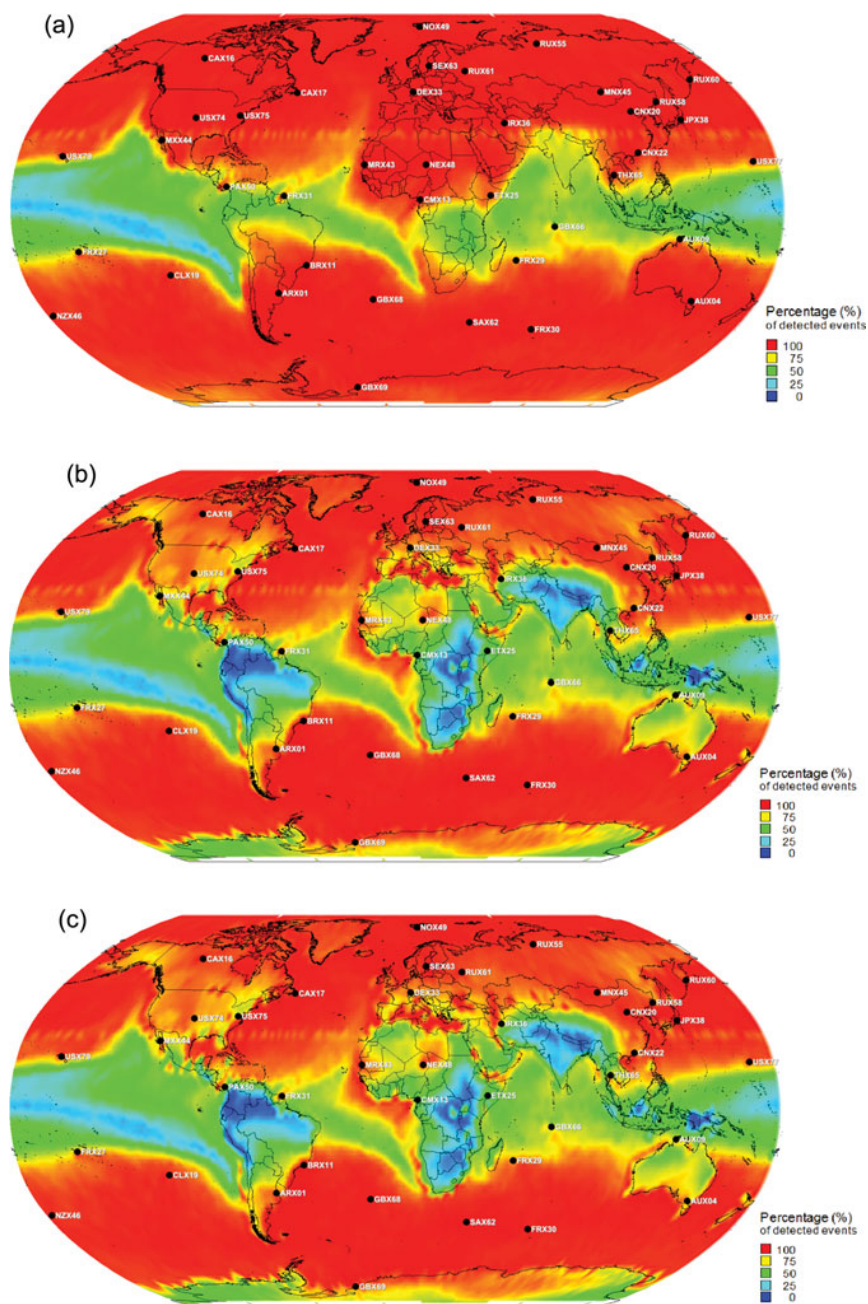


Рисунок 1. Пространственная зависимость покрытия сети для различных сценариев, усредненных в течение одного года для каждой точки сетки. В каждом сценарии метеорологическая обстановка в районе экватора оказывает большое влияние. Процентная доля зарегистрированных событий показывается цветовой шкалой, показанной в правой части рисунков. (a) Атмосферные гипотетические взрывы без фона радиоактивного ксенона. (b) Подповерхностные гипотетические взрывы без фона радиоактивного ксенона. (c) Подповерхностные гипотетические взрывы с учетом фона радиоактивного ксенона от известных ожидаемых источников.

Поскольку выбросы с находящихся на море точек сетки не менялись по отношению к предыдущему сценарию, за это уменьшение покрытия должны быть ответственны пониженные выбросы с точек сетки, расположенных на суше. Это видно на рисунке 1b, где распределение по расположенным над морем точкам сетки точно такое же, как в ранее обсуждаемом сценарии событий на поверхности. В пространственном распределении снова проявляется влияние Междутропической зоны конвергенции над большими районами Атлантического, Индийского, и, в особенности, Тихого океана. При сравнении рисунков 1a и 1b почти на всех массах суши про-

является уменьшение локальной способности обнаружения. Однако, уменьшение выбросов от подповерхностных ядерных взрывов в экваториальных областях вместе с особенной метеорологической обстановкой приводят к явному уменьшению вероятности обнаружения в особенности в Восточной Африке, в северных районах Южной Америки, на Индийском субконтиненте, и в части Юго-Восточной Азии. В дополнение к океанским регионам, на рисунке 1b можно идентифицировать повышенную вероятность обнаружения в некоторых водоемах меньших размеров, такие, как Средиземное море, Каспийское море, или Великие озера в Северной Америке. Их размеры превышают расстояния между локальными точками сетки.

В-третьих, наиболее реалистичный сценарий для расчета покрытия сети не только предусматривает подповерхностные взрывы там, где это возможно, но и также принимает в расчет глобальный фон. Как обсуждалось выше, при включении фона радиоактивного ксенона не обязательно указывает на наличие ядерного взрыва. Присутствие фона в критерии обнаружения приводит к тому, что концентрация C_{ne} должна превышать локальное стандартное отклонение. Для станций со стандартным отклонением меньше минимально обнаружимой концентрации действует предыдущий критерий превышения C_{ne} над минимально обнаружимой концентрацией. Применение данного более жесткого критерия приводит к понижению глобального покрытия сети до $n_{\text{subs+bg}} = (76,4 \pm 2,8)$ процента. Временные ряды суточных значений включают минимум в 70,2 процента и максимум в 82,7 процента. Как и ожидалось, дальнейшее уменьшение в основном вызвано пониженными возможностями обнаружения событий в Северной Америке и Западной Европе (смотрите рисунок 1c). Это связано с высокой региональной плотностью атомных электростанций и установок для производства медицинских изотопов. Удивительно, что региональный фон от атомных электростанций не сильно повлиял на вероятное обнаружение событий на станции JRX38 в Японии. Однако, предыдущее исследование позволяет предположить, что примененная величина выбросов радиоактивного ксенона может быть регионально занижена²⁸. Поэтому реальное влияние в определенных регионах может быть выше, что приведет к дальнейшему уменьшению общего покрытия сети.

Однако, выражение покрытия сети через единственную величину не может охватить контраста между регионами и переменности во времени.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Сезонная зависимость

Общая временная зависимость на протяжении 1 года у всех трех представленных выше сценариев очень похожа. Как видно из рисунка 2, во всех сценариях наблюдаются наиболее характерные совпадающие пики на повседневном основании, например, положительный пик в конце января 2010 года, а также среднесрочные особенности, например, высокое плато между июнем и августом 2010 года. В тропической области Тихого океана были найдены крупные части регионов с малой вероятностью обнаружения. Эта часть мира не только подвержена действию упомянутых выше пассатных ветров, но также и колебаниям «Эль-Ниньо» и «Ла-Нинья»²⁹. «Эль-Ниньо» наиболее заметно проявляется в повышенной поверхностной температуре в западной части Тихого океана, а «Ла-Нинья» – в пониженной поверхностной температуре в восточной экваториальной части Тихого океана; в обоих случаях разности температур достигают по крайней мере $\pm 0,5$ К. В рассматриваемом 2010 году максимальные разности поверхностной температуры по отношению к среднему значению составляли $\pm 1,5$ К³⁰. Однако, эти эффекты могут наблюдаться глобально, через влияние на атмосферное давление в Индийском океане, на пассатные ветры в южной части Тихого океана, и на климат к целом, например, также в Европе и Африке. В 2010 году «Эль-Ниньо» достиг максимума в январе и закончился в марте, а с апреля по июль температура поверхности вошла в норму. С августа и в конце года доминировало влияние «Ла-Нинья». Эти временные периоды коррелировали с измерением покрытия в течение года.

В последующем будут проанализированы особые характеристики трех выбранных временных периодов из третьего сценария (подповерхностные взрывы с фоном). В течение последней трети января 2010 года в покрытии сети проявился положительный пик в 5 – 7 дней с максимальным значением, примерно на 10 процентов выше предшествующего и последующего локальных минимумов, как это видно на рисунке 2. Пространственное перемещение покрытия сети показано на рисунке 3a. Видно, что экваториальные зоны с типично малым обнаружением сузились. «Эль-Ниньо» достиг максимума в январе и поворотная точка в изменении поверхностной температуры могла оказать влияние на механизмы переноса в Тихом океане.

Пространственное распределение в минимуме покрытия сети с 26 по 30 марта показано на рисунке 3b. Видно, что зоны низкой вероятности обнаружения все еще соединены; в них наблюдается исключительно низкая вероятность обнаружения вплоть до нуля процентов в широких областях, и они покрывают существенно

большие области, чем в среднем. Пространственное распределение вероятностей обнаружения в период высокого плато покрытия сети с июня по август 2010 года отдельно представлено на рисунке 3с. При сравнении этого трехмесячного периода с годовым распределением на рисунке 1а видно, что более высокая вероятность между июнем и августом 2010 года связана с различным распределением экваториальной метеорологической обстановки; зоны с низкой вероятностью вокруг экватора меньше, и они даже имеют зернистую структуру, то есть отделены друг от друга зонами высокой вероятности обнаружения.

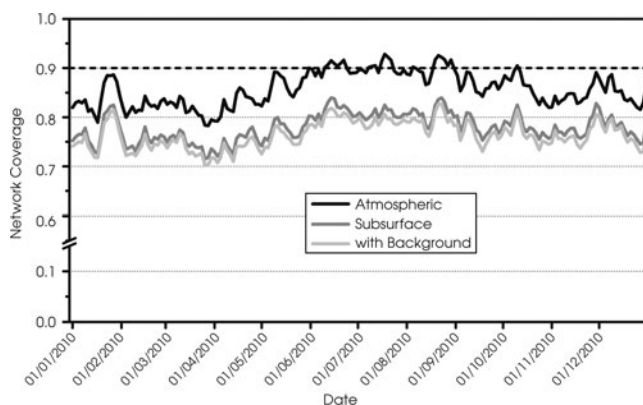


Рисунок 2. Временные ряды покрытия сети за 2010 год. По вертикальной оси отложено покрытие сети, по горизонтальной оси – время. Три сценария (атмосферные – черная линия, подповерхностные – темно-серая линия и подповерхностные с фоном – светло-серая линия) образуют временные ряды с очень похожими характеристиками. Переход от поверхностных к подповерхностным взрывам явно уменьшает покрытие сети, в то время как введение фона оказывает дополнительный (но меньший) отрицательный эффект.

Полагают, что такое изменение вероятностей обнаружения вызывается особым поведением Междутропической зоны конвергенции. В течение этих месяцев, то есть во время лета в северном полушарии, Междутропическая зона конвергенции стремится удаляться от экватора, и, следовательно, позволять гипотетическим выбросам переноситься более эффективно. Такое метеорологическое поведение Междутропической зоны конвергенции обычно не наблюдается во время лета в южном полушарии (зимы в северном полушарии), что согласуется с рассчитанной вероятностью обнаружения, в целом меньшей с января по март 2010 года, как это видно на рисунке 2. Кроме того, появление «Ла Нинья» в течение этих месяцев может повлиять на возможность обнаружения, в особенности для событий в области Тихого океана.

Подводя итоги, заметим, что сезонная зависимость покрытия сети вероятно может быть приписана к метеорологическим эффектам вблизи экватора и к сезонной зависимости механизмов переноса Междутропической зоны конвергенции.

Пространственная зависимость

Как видно из рисунка 1с, высокая вероятность обнаружения наблюдается в широких областях даже в сценарии подповерхностных взрывов с фоном. Как видно на рисунке 4, частотный анализ показывает явный пик для вероятностей обнаружения выше 90%. Однако, если рассматривать только набор точек сетки, расположенных на суше, относительная частота таких высоких вероятностей обнаружения становится заметно меньшей. Такое уменьшение вызывается предполагаемой утечкой в 100 процентов для подводных взрывов и в 1 процент для подземных взрывов. Разница еще больше усиливается из-за большего числа находящихся над водой точек из-за того, что 71 процент земного шара покрыт водой.

События с находящихся над водой точек сетки обладают высокими вероятностями обнаружения во всех сценариях. Различия η для трех рассматриваемых сценариях скорее вызываются изменением вероятности обнаружения событий, базирующихся на суше. Если, например, предположить сценарий с секретно проводимым испытанием, то наиболее вероятно, что это событие будет подземным. Поэтому будет обоснованным обращаться с покрытием наземной сети отдельно от общего покрытия сети. В этом случае покрытия сети для трех сценариев будут отличаться от предыдущих значений:

$$\eta_{\text{atmo:land}} = 91,1\% (+)$$

$$\eta_{\text{subs:land}} = 64,4\% (-)$$

$$\eta_{\text{subs+bg:land}} = 60,2\% (-)$$

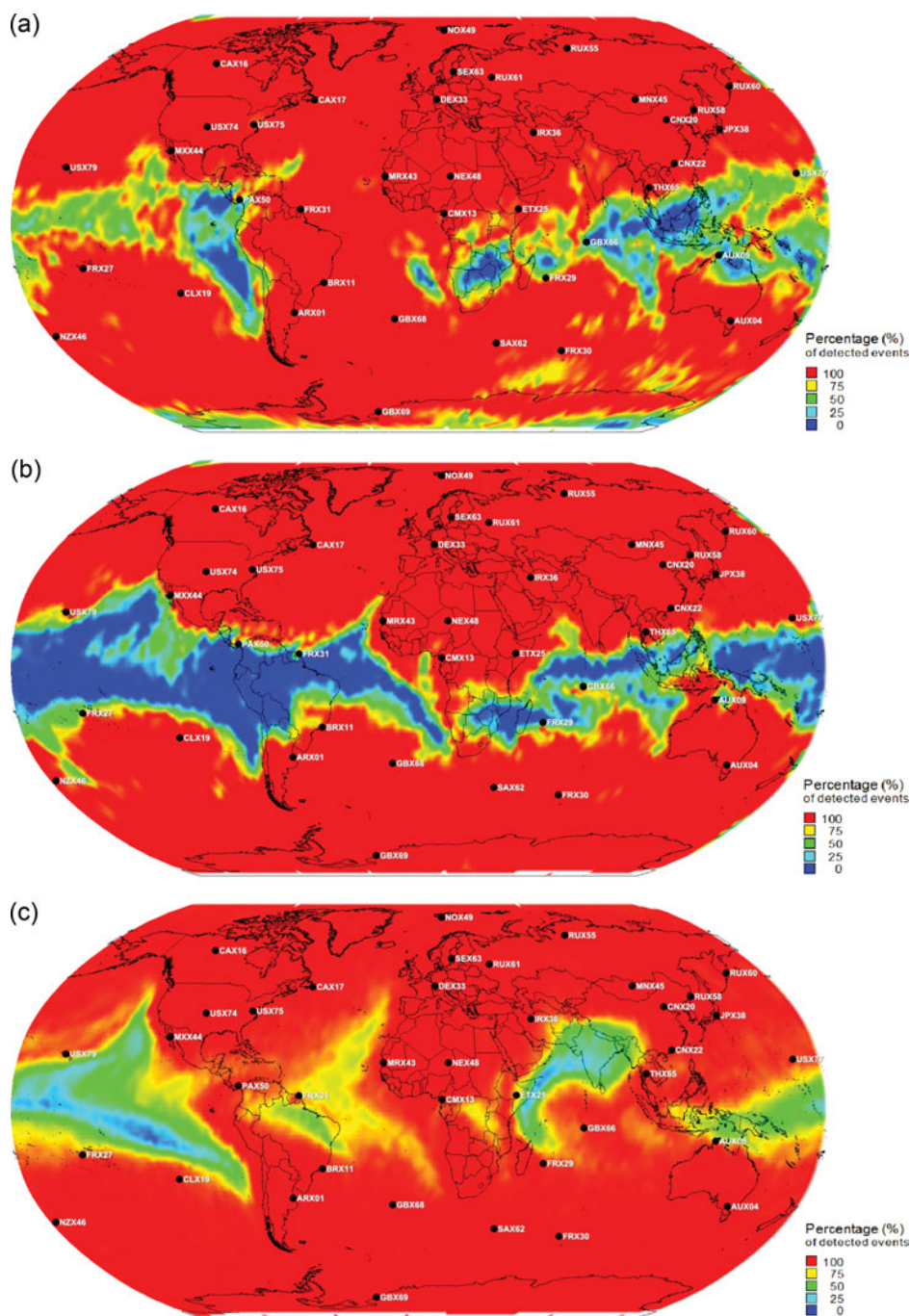


Рисунок 3. Пространственная зависимость покрытия сети в выбранных периодах времени. Процентная доля зарегистрированных событий показывается цветовой шкалой, показанной в правой части рисунков. (a) Повышенное покрытие сети в течение 23 – 27 января 2010 года. (b) Пониженное покрытие сети в течение 26 – 30 марта 2010 года. (c) Повышенное покрытие сети в течение июня–августа 2010 года.

В скобках указывается, будет ли покрытие сети наземного базирования выше или ниже по сравнению с глобальным покрытием. Для сценария поверхностного события без фона покрытие сети на суше на 5,3 процента выше общего глобального покрытия. Это вызвано тем фактом, что глобальное распределение низких вероятностей обнаружения в основном сосредоточено в Тихом океане, то есть на точках сетки над морем, и

тем, что выбросы от событий на суше в большинстве случаев достаточно сильны, чтобы быть обнаруженными. При переходе к сценарию подповерхностных событий без фона на 13,5 процента меньше, чем для всех событий, вместе взятых. Это означает, что покрытие сети наземного чувствительно к предполагаемому выбросу (или утечке) от подземных испытаний. Покрытие для сценария с фоном также меньше на 16,2 процента по сравнению с глобальным значением, что указывает на то, что события наземного базирования более подвержены действию фона радиоактивного ксенона, чем события морского базирования. Это правдоподобно, поскольку источники радиоактивного ксенона находятся на суше и влияют на близко расположенные станции.

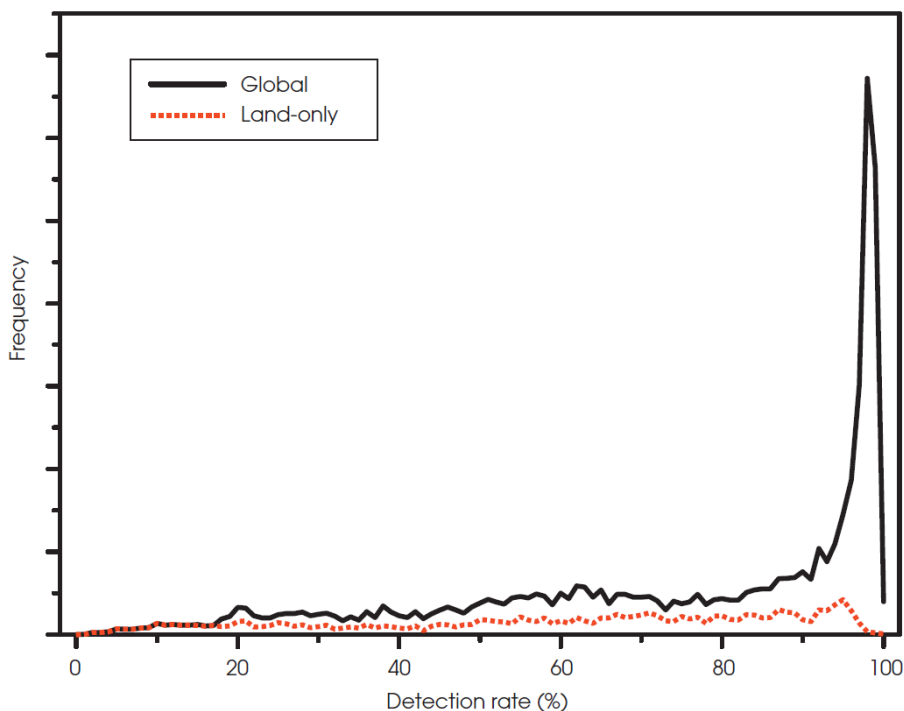


Рисунок 4. Частота появления точек сетки (по вертикальной оси) в зависимости от вероятности обнаружения (по горизонтальной оси, в процентах) для подповерхностного сценария с учетом фона. Точки сетки, расположенные над сушей, реже появляются при высоких вероятностях обнаружения более 90%. Черная линия соответствует всем точкам сетки, красная линия – точкам, расположенным над сушей.

НЕ ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ СОБЫТИЯ

Ранее обсуждались сезонные, а также пространственные зависимости обнаружений. Для того, чтобы понять параметры, влияющие на покрытие сети, необходимо также обсудить пространственное распределение отсутствия обнаружений. В рассмотренных выше моделированиях гипотетических ядерных взрывов событие может остаться необнаруженным из-за двух следующих факторов:

1. Концентрация активности, достигающей станции инертных газов системы МСМ, не удовлетворяет необходимым критериям обнаружения; или
2. Облако выбросов от события не достигло любой станции инертных газов системы МСМ в течение времени моделирования в 14 суток.

В случаях (1) сила выброса и (или) утечка радиоактивного ксенона по отношению к ожидаемому фону является главным фактором в определении того, что событие может быть обнаружено, или нет. В случае (2) моделирования предскажут, что выбросы радиоактивного ксенона от события будут оставаться необнаруженными в любом случае в течение времени моделирования в 2 недели, то есть они являются не обнаружимыми независимо от силы их выброса.

Для каждой точки сетки, в которой предполагался взрыв, для всего временного периода было рассчитано

стях Северной Америки, Африки и Индии, как это можно увидеть из сравнения рисунков 1а и 1с. Для подповерхностного сценария с фоном в этих областях вероятность регистрации может опускаться до 25 процентов, или даже значительно ниже. Большая часть массивов суши в Северной Америке затронута менее значительным, но более однородным и равномерно распределенным уменьшением вероятности обнаружения из-за большого числа источников радиоактивного ксенона.

Таблица 1. Покрытие сети и доли необнаруженных событий для глобальных событий, событий, расположенных на суше, и событий морского базирования*. Выбросы не обнаруживаемых событий не достигают станций инертных газов системы МСМ в течение 14 дней. Оставшаяся доля обозначает события (необнаруженные), для которых моделируемый выброс достигает по крайней мере одной станции инертных газов системы МСМ, но не удовлетворяет критериям обнаружения, т.е. концентрация будет слишком мала.

	Сценарий	Поверхностные (%)	Подповерхностные (%)	С фоном (%)
Всего	Покрытие сети	85,8	77,9	76,4
	Не обнаруживаемые	13,2	13,2	13,2
	Остающиеся	1,0	8,9	10,4
Суша	Покрытие сети	91,1	64,4	60,2
	Не обнаруживаемые	5,9	5,9	5,9
	Остающиеся	3,0	29,7	33,9
Море	Покрытие сети	83,5	83,5	83,0
	Не обнаруживаемые	16,2	16,2	16,2
	Остающиеся	0,3	0,3	0,8

Примечание: * Как отмечалось ранее, выброс 10^{16} Бк ксенона-133 предполагается для поверхностных (расположенных на суше) взрывов и всех взрывов морского базирования, и выброс 10^{14} Бк ксенона-133 предполагается для подземных (расположенных на суше) взрывов для того, чтобы подчеркнуть различие между испытаниями с низкими и высокими выбросами, и их влияние на глобальное покрытие. Как видно из рисунка 5, даже покрытие событий морского базирования с их более высокими выбросами в первую очередь страдает от выбросов, не достигающих станции МСМ.

Доля не обнаруживаемых событий и их пространственное распределение могут быть преодолены только установкой дополнительных станций инертных газов системы МСМ. Дополнительные станции уменьшат среднее расстояние между относящимися к ДВЗЯИ событиями и станциями инертных газов, и, следовательно, уменьшат фактор разбавления. Это увеличит относительное влияние таких событий на ожидаемую концентрацию радиоактивного ксенона на станциях инертных газов. С другой стороны, вероятность обнаружения событий, которые находятся в пределах досягаемости станции мониторинга, но не обнаруживаются из-за невыполнения критерия обнаружения, может быть потенциально улучшена дополнительными станциями инертных газов, улучшенной схемой категоризации (для того, чтобы решить, означает ли образец обнаружение, или нет), и уменьшением ожидаемого фона радиоактивного ксенона.

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ

С самого начала система МСМ проектировалась для равномерного покрытия поверхности всего земного шара без всякого особенного внимания или акцента на конкретные районы, такие, как бывшие полигоны ядерных испытаний. Для того, чтобы достичь такой цели, станции мониторинга были более или менее равномерно распределены по земному шару. Из-за более однородного распространения волн под землей, в океане и в атмосфере требование равномерного покрытия легче выполнить для технологий, основанных на формах волновых сигналов, чем для сети мониторинга радионуклидов. Как было показано, эффективность мониторинга радионуклидов подвержена влиянию неоднородной метеорологической обстановки. Распределение станций не соответствует распределению розы ветров и плотность станций следовало бы увеличить в экваториальных областях. Известными случаями испытаний для системы МСМ являются три ядерных испытания в Северной Корее в 2006, 2009 и 2013 годах. Хотя правительство Северной Кореи объявило об этих испытаниях, все они были обнаружены на сейсмических станциях. Кроме того, в мае 2010 года несколько станций МСМ в Юго-Восточной Азии обнаружили следы различных радионуклидов³¹. Тем не менее, тип источника и местоположение источника для этих обнаружений все еще служат предметом споров. Ядерное испытание или аварию на территории Северной Кореи исключить нельзя, но наблюдения на южнокорейской станции, не входящей в состав

МСМ, могут повысить возможность обратного отслеживания.

При испытании 2006 года мощностью 0,65 – 1,1 кт самая ближайшая подветренная станция в Такасаки, Япония, не работала, но подозрительные концентрации ксенона-133 были обнаружены в Йеллоунайфе, Канада³². Для испытания 2009 года мощностью 1,5 – 4,5 кт не было обнаружено никаких инертных газов несмотря на то, что испытание было более мощным, чем предыдущее, и японская станция работала. При испытании 2013 года мощностью 6 – 9 кт концентрации радиоактивного ксенона были обнаружены только через шесть недель после испытания³³. В противоположность этому, карта покрытия сети указывает на высокую вероятность обнаружения выбросов из этого региона. Удержание инертных газов в полости взрыва, по-видимому, играет наиболее важную роль в трех случаях испытаний в Северной Корее. Это означает, что успешное обнаружение зависит не только от переноса в атмосфере, системы обнаружения, и фона, но также сильно зависит от утечки из-под земли в атмосферу.

Кроме того, представляет интерес покрытие других стран, с особым вниманием к странам из перечня в Приложении 2; научный интерес для предоставления глобального покрытия и политический интерес для последующего процесса ратификации ДВЗЯИ. Следующие страны из перечня в Приложении 2 включают в себя регионы со среднегодовой вероятностью обнаружения менее 50 процентов: Алжир, Аргентина, Австралия, Бангладеш, Бразилия, Канада, Чили, Китай, Колумбия, Конго, Египет, Индия, Индонезия, Иран, Мексика, Пакистан, Перу, Испания, Южная Африка, и Соединенные Штаты.

Хотя некоторые страны, например, Соединенные Штаты, подвержены влиянию фона радиоактивного ксенона, в большинстве случаев основной причиной является метеорологическая обстановка. Будущее покрытие индийского субконтинента будет зависеть от местоположения планируемой станции мониторинга. Тем не менее, трудности надежного режима ратификации используются некоторыми странами в качестве аргумента против ратификации ДВЗЯИ³⁴. Поэтому такие региональные «слепые пятна» компонента инертных газов системы МСМ могут различными способами повлиять на позицию стран в отношении к ДВЗЯИ. Во-первых, это поддерживает аргументы против ратификации ДВЗЯИ. Во-вторых, присутствие и местоположение таких «слепых пятен» может потенциально мотивировать затронутые страны поддерживать открытым вариант программы ядерного оружия. Следовательно, увеличение количества станций мониторинга инертных газов полезно и служит интересам верифицируемого ДВЗЯИ.

Рекомендуется добавить больше станций, в особенности в экваториальных областях, для корректировки метеорологической обстановки. Любые дополнительные региональные расширения сети станций мониторинга инертных газов будут также зависеть от дальнейшего глобального простора фона радиоактивного ксенона.

СВОДКА И РЕКОМЕНДАЦИИ

Станции инертных газов системы МСМ были распределены по земному шару более или менее равномерно, что, в результате, не принимало во внимание метеорологические процессы переноса в экваториальной области. Поэтому появились «слепые пятна», понижающие вероятность регистрации ядерных взрывов. Кроме того, не принималось в расчет распределение ожидаемых источников радиоактивного ксенона, которое в основном определяется экономическими факторами. Такие установки, очевидно, оказывают отрицательное влияние, но скорее региональное, чем глобальное. Это означает, что установки для производства медицинских изотопов могут существенно уменьшить покрытие в подветренных областях, но суммарное воздействие на глобальное покрытие земной поверхности, включая океаны, будет небольшим. Однако, из-за экономической природы рынка медицинских изотопов, очевидно, что количество излучателей и их выбросы со временем будут изменяться. Соответственно изменение влияния на вероятность обнаружения также будет региональным. Поэтому для эффективной и стабильной возможности обнаружения инертных газов исключительно важно будет уменьшать, или, по крайней мере, поддерживать существующий уровень фона, который в основном создается установками для производства медицинских изотопов. В интересах договора было бы целесообразно следовать предложенному максимуму выбросов, например, 5 Гбк/день³⁵. Такое указание легче реализовать для новых установок, чем для существующих, для которых трудно обосновать дорогие изменения уже утвержденных государством процессов на своей установке, которые не противоречат любому соответствующему законодательству.

Возможны дальнейшие улучшения посредством лучшего понимания фона инертных газов, и применения более усложненных критериев обнаружения, например, включающих изотопные отношения и (или) анализ временных рядов.

Однако, в настоящее время наибольшее усиление компонента инертных газов может быть достигнуто добавлением станций в определенных экваториальных регионах. Проблема выбросов, которые не успевают достичь станции мониторинга за время моделирования в 2 недели, отрицательно влияет на компонент инертных газов системы МСМ в аспекте его задачи доказать ядерный характер события. В таком сценарии надо будет опираться на другие средства верификации, такие, как технологии, основанные на формах волновых сигналов, инспекции на месте, и (или) дипломатическое разъяснение. Компонент инертных газов не достиг своего полного потенциала и он получит преимущество от дополнительных станций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы с признательностью приняли поддержку от Национального научно-технического комитета Национального института ядерной физики по проекту мониторинга радиоактивности окружающей среды для наук о Земле (ERMES). Авторы признательны компьютерной лаборатории Итальянского национального института ядерной физики и физико-математическому факультету университета «Рома Тре». Данные о станциях и образцах были любезно предоставлены через виртуальный центр эксплуатации данных (vDEC) в рамках соглашения между Организацией по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и физико-математическим факультетом университета «Рома Тре». Моделирование переноса в атмосфере проводилось с метеорологическими данными, предоставленными Европейским центром по среднесрочному прогнозированию погоды по соглашению о сотрудничестве с физико-математическим факультетом университета «Рома Тре».

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Joachim Schulze, Matthias Auer, and Robert Werzi, "Low Level Radioactivity Measurement in Support of the CTBTO," *Applied Radiation and Isotopes*, 53 (2000): 23–30.
2. Dahlman, Ola, Svein Mykkeltveit, and Hein Haak, *Nuclear Test Ban: Converting Political Visions to Reality* (Berlin: Springer, 2009).
3. Martin Kalinowski, "Characterisation of Prompt and Delayed Atmospheric Radioactivity Releases from Underground Nuclear Tests at Nevada as a Function of Release Time," *Journal of Environmental Radioactivity*, 102 (2011): 824–836.
4. Martin Kalinowski and Matthias Tuma, "Global Radioxenon Emission Inventory Based on Nuclear Power Reactor Reports," *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (2009): 58–70; Gerhard Wotawa, Andreas Becker, Martin Kalinowski, Paul Saey, Matthias Tuma, and Matthias Zaehring, "Computation and Analysis of the Global Distribution of the Radioxenon Isotope 133-Xe based on Emissions from Nuclear Power Plants and Radioisotope Production Facilities and its Relevance for the Verification of the Nuclear-Test-Ban Treaty," *Pure and Applied Geophysics*, 167(2010): 541–557.
5. Matthias Auer, Timo Kumberg, Hartmut Sartorius, Bernd Wernsperger, and Clemens Schlosser, "Ten Years of Development of Equipment for Measurement of Atmospheric Radioactive Xenon for the Verification of the CTBT," *Pure and Applied Geophysics*, 167 (2010): 471–486.
6. Сцинтилляционный детектор из йодистого натрия с добавкой таллия.
7. *Ten Years of Development of Equipment*, 471–486 (ссылка 5).
8. Paul Saey, Theodore Bowyer, and Anders Ringbom, "Isotopic Noble Gas Signatures Released from Medical Isotope Production Facilities – Simulations and Measurements," *Applied Radiation and Isotopes*, 68 (2010): 1846–1854.
9. *Global Radioxenon Emission Inventory*, 58–70 (ссылка 4).
10. Paul Saey, "The Influence of Radiopharmaceutical Isotope Production on the Global Radioxenon Background," *Journal of Environmental Radioactivity*, 100 (2009): 396–406.
11. *Workshop on Signatures of Medical and Industrial Isotope Production*, organized by Pacific Northwest National Laboratory in Strassoldo, Italy, 12–17 June 2011 and 18–22 June 2012.
12. Частное сообщение Benoit Deconninck (National Institute for Radioelements, IRE) и Emmy Hoffmann (Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO).
13. *Global Radioxenon Emission Inventory*, 58–70 (ссылка 4).
14. Система информации МАГАТЭ об энергетических реакторах (PRIS), доступная по адресу www.iaea.org/programmes/a2/.

15. Andreas Stohl, Harald Sodemann, Sabine Eckhardt, A. Frank, Petra Seibert, and Gerhard Wotawa, "The Lagrangian Particle Dispersion Model Flexpart version 8.2," доступная по адресу <http://flexpart.eu>.
16. Gerhard Wotawa et al., "Atmospheric Transport Modelling in Support of CTBT Verification – Overview And Basic Concepts," *Atmospheric Environment*, 37 (2003): 2529–2537.
17. *Atmospheric Transport Modelling in Support of CTBT Verification*, 2529–2537 (ссылка 16).
18. Wolfgang Plastino, Romano Plenteda, Georgio Azzari, Andreas Becker, Paul Saey, and Gerhard Wotawa, "Radioxenon Time Series and Meteorological Pattern Analysis for CTBT Event Categorisation," *Pure and Applied Geophysics*, 167 (2010): 559–573.
19. *Computation and Analysis of the Global Distribution of the Radioxenon Isotope*, 541–557 (ссылка 4).
20. Michael Schoepfner, "Analysis of the Global Radioxenon Background with Atmospheric Transport Modelling for Nuclear Explosion Monitoring," Ph.D. thesis at the University of Roma Tre, 2012.
21. Peter Osborne, "The Mercator Projections," Edinburgh, 2008, <http://www.mercator99.webspace.virginmedia.com/mercator.pdf>.
22. Земля представляется в виде эллипсоида с экваториальным радиусом $r_{\text{экр}} = 5378$ км, полярным радиусом $r_{\text{пол}} = 6357$ км и эксцентриситетом $e^2 = ((r_{\text{экр}})^2 - (r_{\text{пол}})^2)/(r_{\text{экр}})^2 = 6,57 \cdot 10^{-3}$.
23. *Analysis of the Global Radioxenon Background* (ссылка 20).
24. Andreas Stohl, M. Hittenberger, and Gerhard Wotawa, "Validation of the Lagrangian Particle Dispersion Model Flexpart Against Large-Scale Tracer Experiment Data," *Atmospheric Environment*, 32 (1998): 4245–4264.
25. *Computation and Analysis of the Global Distribution of the Radioxenon Isotope*, 541–557 (ссылка 4); *Analysis of the Global Radioxenon Background* (ссылка 20).
26. *Analysis of the Global Radioxenon Background* (ссылка 20).
27. Междутропическая зона конвергенции (МТЗК) – это область вблизи экватора шириной в несколько сотен километров, характеризующаяся постоянной конвергенцией воздушных масс. Связанные с нею облака могут подниматься до стратосферы. Местоположение МТЗК зависит от времени года. С января по июль она перемещается в северном направлении. Доминирующую картину ветров в северном и южном направлении в МТЗК представляют пассаты.
28. Blake Orr, Michael Schoepfner, Rick Tinker, and Wolfgang Plastino, "Detection of Radioxenon in Darwin, Australia Following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, 126 (2013): 40–44; M. Schoepfner, M. Kalinowski, W. Plastino, A. Budano, M. Vincenzi, A. Ringbom, F. Ruggieri, and C. Schlosser, "Impact of Monthly Radioxenon Source Time-Resolution on Atmospheric Concentration Predictions," *Pure and Applied Geophysics*, 171(2014): 699–705; *Computation and Analysis of the Global Distribution of the Radioxenon Isotope*, 541–557 (ссылка 4).
29. Эль-Ниньо и Ла-Нинья – это квазипериодические метеорологические явления, возникающие в тропической части Тихого океана.
30. National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Prediction Center of the National Centers for Environmental Prediction, "ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions," http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf, 2012.
31. L.-E. De Geer, "Radionuclide Evidence for Low-Yield Nuclear Testing in North Korea in April/May 2010," *Science & Global Security*, 20 (2012): 129; G. Wotawa, "Meteorological Analysis of the Detection of Xenon and Barium/Lanthanum Isotopes in May 2010 in Eastern Asia," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296(2013): 339–347; C. M. Wright, "Low-Yield Nuclear Testing by North Korea in May 2010: Assessing the Evidence with Atmospheric Transport Models and Xenon Activity Calculations," *Science & Global Security*, 21(2013): 3–52.
32. Anders Ringbom, Klas Elmgren, K. Lindh, Jenny Peterson, Theodore Bowyer, James Hayes, Justin McIntyre, M. Paninsko, and R. Williams, "Measurements of Radioxenon in Ground Level Air in South Korea Following the Claimed Nuclear Test in North Korea on October 9, 2006," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 282 (2009): 773–779.
33. Anders Ringbom et al., "Radioxenon Detections in the CTBT International Monitoring System Likely Related to The Announced Nuclear Test in North Korea on February 12, 2013," *Journal of Environmental Radioactivity*, 128 (2014): 47–63.
34. Katarzyna Kubiak, "CTBT Hold-out States. Why did the Longest Sought, Hardest Fought Prize in Arms Control History Still Not Enter Into Force?" Institute for Peace Research and Security Policy at the University of Hamburg, IFAR Working Paper No. 16, June 2011.
35. Harry Miley, Theodore Bowyer, Paul Eslinger, Rosara Kephart, and Paul R. J. Saey, "Releases from Medical

Isotope Production Facilities and Their Effect on Monitoring Nuclear Explosions," Workshop on Signatures of Medical and Industrial Isotope Production, Strassoldo, Italy, 2012.