

Low-Yield Nuclear Testing by North Korea in May 2010:
Assessing the Evidence with Atmospheric Transport Models and Xenon Activity Calculations
Christopher M. Wright
Science and Global Security, 2013, Volume 21, No. 1, pp. 3-52

ЯДЕРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЕВЕРНОЙ КОРЕИ В МАЕ 2010 ГОДА: ОЦЕНКА ДОКАЗАТЕЛЬСТВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА И РАСЧЕТОВ АКТИВНОСТИ КСЕНОНА

Кристофер М. Райт

АННОТАЦИЯ

В этой статье исследуется гипотеза (высказанная Де Геером в 2012 году) о том, что радионуклиды, обнаруженные на станциях в Южной Корее, Японии и России в мае 2010 года, были свидетельством того, что Северная Корея провела 11 мая по крайней мере одно необъявленное испытание ядерного оружия малой мощности. В ней представлены результаты моделирования атмосферного переноса наблюдаемых радионуклидов с помощью программы HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, или Гибридная модель одночастичной лагранжевой интегрированной траектории), предполагающего варианты происхождения в Северной Корее, Республике Корея, Японии, России, континентальном Китае и Тайване. Расчеты активности ксенона для изотопов, образующихся в реакторе и при взрыве, использовались для определения возможных отношений выброса и параметров источника выброса. Моделирование по программе HYSPLIT показало, что наиболее вероятная область происхождения радионуклидов близка к площадке объявленных Северной Кореей ядерных испытаний в 2006 и 2009 годах. Расчеты активности показали, что параметры источника выброса согласуются с испытанием ядерного оружия мощностью до нескольких сотен тонн. Эти результаты обсуждаются в контексте сейсмически развязанного, но не камуфлетного испытания ядерного оружия Северной Кореей 11 мая 2010 года. Если сценарий, предложенный Де Геером и поддержанный здесь, правилен, то представляется, что имеется существенная возможность обнаружения даже небольшого сейсмически развязанного испытания ядерного оружия в Северо-Восточной Азии с использованием компонентов Международной системы мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.

Кристофер Райт работает в Школе физических, экологических и математических наук Университета Нового Южного Уэльса, Канберра, Австралия.

Автор с признательностью благодарит Лабораторию воздушных ресурсов Национальной администрации по океану и атмосфере США за предоставление модели переноса и дисперсии HYSPLIT и веб-сайта READY, используемых в данной публикации.

Взгляды, представленные в этой публикации, принадлежат автору, и не обязательно отражают взгляды любого другого лица.

Почтовый адрес для корреспонденции: Christopher M. Wright, School of Physical, Environmental and Mathematical Sciences, The University of New South Wales, P.O. Box 7916, Canberra BC ACT 2610, Australia.

Адрес электронной почты: c.wright@adfa.edu.au

Статья получена 2 августа 2012 года и принята к публикации 19 октября 2012 года.

ВВЕДЕНИЕ

Де Геер сообщил в этом журнале, что в середине мая 2010 года на корпускулярной станции Международной системы мониторинга (IMS) Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (CTBT) в Окинаве, Япония несколько раз регистрировались изотопы Ba-140 вместе с La-140, что стало первым таким обнаружением Ba-140 на станциях системы IMS; на южнокорейской станции инертных газов в Коджине вблизи северокорейской границы регистрировались Xe-135 и Xe-133 с соотношением, не наблюдавшимся ранее в течение приблизительно 3 лет работы, и, возможно, с концентрациями активности, не наблюдавшимися здесь никогда ранее; и, на российской станции системы IMS в Уссурийске и на японской станции системы IMS в Такасаки соответственно наблюдались La-140 и ксенон (с меньшими концентрациями)¹. Де Геер обнаружил, с помощью

расчетов метеорологического переноса в обратном направлении в комбинации с программным обеспечением Web-Grape, что воздушные массы, несущие пылевые частицы и инертные газы к станциям на Окинаве, в Коджине, Уссурийске и Такасаки, за несколько дней до регистрации проходили над Северной Кореей². Впоследствии Вотава в общих чертах подтвердил атмосферное моделирование де Геера³. Де Геер допустил, что Северная Корея провела не объявленное и, возможно, сейсмически развязанное испытание ядерного оружия.

Наблюдавшееся на Окинаве соотношение Ba-140 и La-140 использовалось Де Геером для временной привязки события к универсальному скоординированному времени (UTC) 0600 11 мая 2010 года с диапазоном неопределенности от +18 часов до -30 часов. Произошел практически мгновенный выброс инертных газов, включающих Xe-140 и Xe-137, которые, благодаря своим коротким временам полураспада (13,6 секунды и 3,8 минуты), быстро распадались до Ba-140, La-140 и Cs-137⁴. Ba-140, La-140 и Cs-137 впоследствии были зарегистрированы на Окинаве, в то время как в Уссурийске наблюдались только изотопы с массовым числом 140. В модели Де Геера приблизительно через 36 часов после взрыва произошел другой выброс инертных газов, что привело к обнаружению Xe-133 и Xe-135 в Коджине. Де Геер отметил, что правдоподобным кандидатом на расположение выброса может быть площадка испытаний ядерного оружия в Северной Корее в 2006 и 2009 годах.

В данной статье представлены расчеты прямого переноса в режиме простой траектории и в режиме концентрации в полном факеле для расположений кандидатов-источников в наблюдениях частиц и инертных газов, представленных де Геером. В качестве возможных источников выбросов рассматриваются ядерный взрыв, ядерный энергетический реактор, и установка для производства медицинских изотопов. В следующем разделе подробно рассмотрено моделирование переноса в атмосфере, в режимах прямой и обратной траектории. Далее рассматриваются потенциальные параметры выброса для ядерного взрыва с помощью расчетов активности ксенона, как от U-235, так и от Pu-239, для того, чтобы определить, согласуются ли такие параметры с наблюдаемыми концентрациями. Результаты интерпретируются в контексте сейсмически развязанного, но не камуфлетного испытания ядерного оружия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЙ В КОДЖИНЕ И НА ОКИНАВЕ

Моделирование атмосферного переноса с использованием одиночных траекторий и турбулентной дисперсии факела проводилось с помощью программы Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, или Гибридная модель одночастичной лагранжевой интегрированной траектории (выпуск июля 2011 года, HYSPLIT4)⁵. Программа HYSPLIT успешно использовалась для многих различных типов сценариев переноса, включая аэрозоли, химические загрязняющие вещества, и радиоактивные изотопы в сценариях, относящихся к Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СВТ)⁶. Этот тип моделирования может включать значительные неопределенности, численные и физические по своей природе; они подробно обсуждаются Столем и другими⁷. По совокупности рассмотренных Столем работ, которые включали трассировочные эксперименты, можно получить приемлемую оценку отклонения модели от «истинной» траектории, которая, как представляется, составляет 20 – 30 процентов от полной дистанции распространения. В некоторых приведенных случаях это отклонение меньше, но сообщались также случаи, в которых отклонение достигало 180 градусов, то есть модельные и истинные траектории были противоположно направлены. Вероятно, можно принять приблизительно линейное отклонение в 50 – 200 км/сутки – в зависимости от пространственного и временного разрешения метеорологических данных – для времени перемещения до 4 суток⁸.

Полное исследование чувствительности выходит за рамки данной статьи, хотя были испытаны два набора метеорологических данных. В качестве «стандарта» применялся глобальный архив данных для повторного анализа от Национального центра предсказания окружающей среды США (NCEP) и Национального центра исследования атмосферы США (NCAR)⁹. Он доступен в виде сетки шириной 2,5 градуса по широте и долготе с временным интервалом в 6 часов. Для некоторых расчетов также использовались данные из Глобальной системы ассимиляции данных (GDAS) Национального центра предсказания окружающей среды США (NCEP) в виде сетки шириной 1 градус по широте и долготе с временным интервалом в 3 часа. Вотава использовал данные из Европейского центра среднесрочных предсказаний погоды с пространственным разрешением 0,5 градуса и временным разрешением 3 часа¹⁰.

Данные для повторного анализа и данные из системы ассимиляции данных (GDAS) широко использовались в литературе, но прямое сравнение между ними проводилось редко. Единого мнения о том, какой набор данных более точно воспроизводит реальные наблюдения, не существует. В некоторых случаях они по существу эквивалентны, в то время как в других данные из системы ассимиляции данных предпочтительны¹¹. Более высокое пространственное разрешение данных из системы ассимиляции данных по сравнению с данными для повторного анализа позволяет предположить, что в целом эти данные будут лучше, то есть, они будут менее

чувствительны к ошибкам интерполяции. Однако, было показано, что так происходит не всегда, и можно предположить, что относительные преимущества двух наборов данных надо определять по каждому отдельному пункту, в зависимости от таких параметров, как местный рельеф и время года¹². Кроме того, разрешение данных для повторного анализа NCEP-NCAR хорошо приспособлено к явлениям синоптического масштаба, которые представляют основной интерес в данном исследовании. Этот тезис в некоторых пределах поддерживается работой Дрекслера, который применял программу HYSPLIT и данные для повторного анализа в довольно успешном воспроизведении факелов криптона-85 от перерабатывающего завода Саванна Ривер на расстояниях до 1 000 км¹³.

Полигон для испытаний ядерного оружия в Северной Корее (NKTS) и ее комплекс для производства расщепляющегося материала в Йонбене рассматриваются ниже как возможные места происхождения выбросов пылевых частиц и (или) инертных газов. Представляется логичным, что Северная Корея будет проводить любые дополнительные ядерные испытания на полигоне NKTS, учитывая существующую инфраструктуру и опыт, связанный с проведением своих испытаний в этом месте в 2006 и 2009 годах. Расщепляющийся материал для устройств, испытанных в 2006 и 2009 годах, был произведен в Центре ядерных исследований в Йонбене. Несколько других известных или предполагаемых площадок, относящихся к ядерной программе Северной Кореи, расположены на расстоянии около 50 км от Йонбена¹⁴. Времена возникновения были рассчитаны Де Геером для мгновенного выброса с использованием соотношения Ва-140/La-140; то есть первый выброс в 0600 UTC 11 мая 2010 года, и задержанный выброс на 36 часов позже.

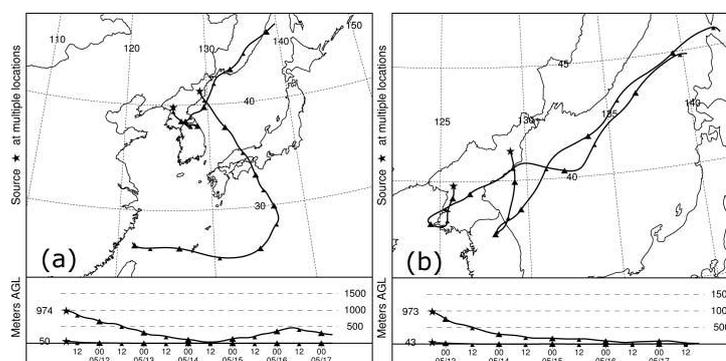


Рисунок 1. (а) Траектории факелов, начинающиеся в 0600 UTC 11 мая 2010 года от 1500 м над уровнем моря от полигона NKTS и 440 м над уровнем моря от Йонбена (в используемых здесь глобальных метеорологических данных для повторного анализа «средний» уровень на полигоне NKTS и в Йонбене соответственно равен 526 м и 390 м). Представляющая мгновенный выброс траектория от полигона NKTS проходит над Окинавой между 15 и 16 мая 2010 года, что согласуется с первым обнаружением бария-140 на Окинаве. (б) Траектория факела, начинающаяся в 1800 UTC 12 мая 2010 года. Представляющая задержанный выброс и также использующая метеорологические данные для повторного анализа, траектория проходит над Коджином около 13 – 14 мая 2010 года, в соответствии с первым обнаружением ксенона-133 и ксенона-135 в Коджине.

На рисунке 1а показана прямая траектория, начинающаяся в сейсмически определенных координатах полигона NKTS¹⁵, и на уровне 1 500 м над уровнем моря, и проходящая почти точно над Окинавой почти точно в то же самое время, когда было сделано соответствующее обнаружение. Были также рассчитаны траектории с временами выброса внутри пределов ошибок определения по отношению Ва-140/La-140, но траектория с временем выброса 0600 UTC 11 мая 2010 года является наиболее убедительной траекторией для обнаружения на Окинаве. Траектория из Йонбена не проходит рядом с Окинавой; она впервые проходит над Республикой Корея вблизи Коджина перед поворотом на север и потенциально проходит над Уссурийском. Обнаружение в Коджине должно было бы произойти примерно в наблюдаемое время, но его сигнатура должна была бы соответствовать мгновенному выбросу – отношение Хе-135/Хе-133 должно было быть больше, а активность Хе-133m должна была бы быть больше, чем у Хе-133 – в то время как в Коджине не было обнаружено никакого Хе-133m. Более того, обнаружения в Уссурийске должны быть значительно больше, чем наблюдаемые.

Для задержанного выброса прямая траектория, начинающаяся в 1800 UTC 12 мая 2010 года от полигона NKTS, проходит очень близко к Коджину во время соответствующего обнаружения. В этом случае любое время начала между 6 часами ранее и 18 часами позднее может воспроизвести сигнал в Коджине в примерно пра-

вильное время. Траектория от Йонбена пройдет далеко к северу от Коджина на день, или около, позже наблюдавшегося обнаружения (рисунок 1b).

Для начала ранее 1800 UTC траектория от Йонбена будет проходить постепенно ближе к Йонбену, тогда как для более позднего начала она будет постепенно удаляться от него. Существенное наблюдение, поддерживающее гипотезу о начале на полигоне NKTS, заключается в том, что траектории как на Окинаве, так и в Коджине – и, таким образом, и сами воздушные массы – опускаются с высоты полигона NKTS до высоты, на которой факел может быть обнаружен наземными станциями на высоте примерно в 100 м над уровнем моря.

Аналогично, обратная траектория от Окинавы проходит через полигон NKTS в прекрасном согласии с мгновенным выбросом от гипотетического взрыва 11 мая 2010 года примерно в 0600 UTC. На рисунке 2a показано, что поведение траектории по высоте также качественно правильное. Траектория также проходит близко к Йонбену, но примерно на 12 часов раньше времени события, определенного из отношения Ва-140/Ла-140 (хотя все еще в пределах ошибок). Для Коджина удовлетворительная обратная траектория также прослеживается до полигона NKTS для задержанного на 36 часов выброса (рисунок 2b). И снова поведение возвышения качественно правильно. В этом случае траектория не проходит рядом с Йонбеном.

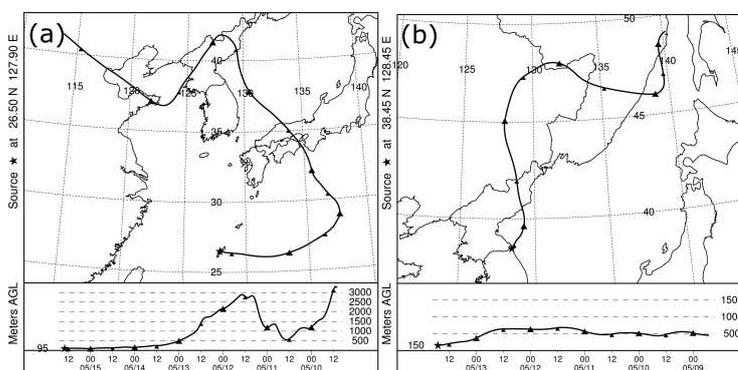


Рисунок 2. (a) Обратная траектория от Окинавы, заканчивающаяся в 1400 UTC 15 мая 2010 года (то есть, вблизи середины первого периода сбора). Траектория, построенная с использованием данных GDAS, проходит прямо над полигоном NKTS приблизительно во время взрыва, рассчитанного Де Гиром как 0600 UTC 11 мая 2010 года. (b) Обратная траектория от Коджина, заканчивающаяся в 1700 UTC 13 мая 2010 года, в середине периода сбора образца. Траектория, построенная по данным глобального повторного анализа, проходит почти над полигоном NKTS в момент, близкий к предполагаемому задержанному на 36 часов выбросу.

Анализ очевидно показывает, что Северная Корея предоставляет правдоподобное объяснение обнаружения пылевых частиц и инертных газов, соответственно на Окинаве и в Коджине, и что полигон NKTS (или его окрестности) является основным кандидатом в Северной Корее. Уровень соответствия между моделями атмосферных траекторий и данными по радионуклидам, как в пространственных, так и во временных координатах, довольно примечателен, так же, как и тот факт, что единственная точка, в которой пересекаются обратные траектории, расположена поблизости от полигона NKTS. То, что для прямых и обратных траекторий использовались различные наборы метеорологических данных, обеспечивает уверенность в ошибкоустойчивости результатов, потому что в большинстве случаев ансамбли траекторий, построенных с использованием глобальных данных повторного анализа и данных GDAS, вообще говоря, были вполне согласующимися¹⁶. Более того, то, что различные программы атмосферного переноса – HYSPLIT в этой работе, Web-Grape у ДеГеера и FLEXPART у Вотава – и три метеорологических набора данных предоставляют согласующиеся результаты, обеспечивает еще большую уверенность.

Обратные траектории от Окинавы и Коджина также помогают ограничить другие возможные места происхождения выбросов радионуклидов. Для обнаружений на Окинаве возможными местами происхождения могут быть небольшие области в восточном Китае, южной России, юго-западной Японии, и (менее вероятно) Южной Кореи. Но в большинстве случаев время, в которое траектории проходят через эти области, не совпадает с рассчитанным Де Геером временем события деления, например, до этого события в случае Китая, или после него в случае Японии. Для обнаружений в Коджине Япония и Южная Корея, по-видимому, исключаются, а часть Китая, которая может рассматриваться как возможный источник, едва перекрывается с тем, что получается из обратных траекторий с Окинавы, и не включает в себя никаких известных ядерных установок. Из ансамбля рассчитанных обратных траекторий, единственным местоположением кроме северо-восточной части Северной

Кореи, которое может рассматриваться как возможное место происхождения обнаружений Ва/La и Хе, является близлежащая российская военно-морская база в Большом Камне.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЙ В УССУРИЙСКЕ И ТАКАСАКИ

Из-за существенно меньшей величины сигнала обнаружениям в Уссурйске (Россия) и Такасаки (Япония) в мае 2010 года при оценке их отношения к возможному ядерному испытанию в Северной Корее уделялось гораздо меньше внимания. Даже в таком случае моделирование по программе HYSPLIT показало, что можно проследить связь Уссурйска с полигоном NKTS, но нельзя просто сделать то же самое для Такасаки.

Учитывая редкость обнаружений Ва-140 или La-140 в сети регистрации радионуклидов Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, регистрация La-140 в Уссурйске является сильным косвенным свидетельством происхождения от испытания ядерного оружия¹⁷. Хотя Де Геер сообщает только о регистрации La-140, отмечая, что ожидаемая активность Ва-140, экстраполированная по наблюдаемому сигналу La-140, будет меньше минимально обнаружимой концентрации, Вотава указывает, что Ва-140 также присутствовал в фильтрах Уссурйска¹⁸.

Однако, все еще остаются несколько потенциальных проблем с обнаружениями в Уссурйске. Во-первых, как видно из рисунка 1, трудно понять, как мгновенный выброс найдет свою дорогу на север, несмотря на относительную близость Уссурйска к полигону NKTS. Однако, учитывая на порядок величины меньшие, чем наблюдались на Окинаве, активности, обнаруживаемые в Уссурйске, эту проблему можно ослабить, предположив, что они возникают из «вторичного факела», который отделился от основного факела, движущегося в южном направлении. Моделирование по программе HYSPLIT доказывает, что такое в самом деле может произойти (рисунок 3). Кроме того, если предположить, что оборудование для регистрации инертных газов для станции радионуклидов в Уссурйске в это время работало, то встает вопрос, почему не был обнаружен ксенон. Возможно, частичный ответ состоит в том, что после мгновенного выброса Хе-135 должно было пройти 10,5 периодов полураспада, но остается открытой возможность регистрации Хе-133, и возможно также, Хе-133m. Для определения возможного превышения активности над минимально обнаружимыми концентрациями потребуются более подробные вычисления.

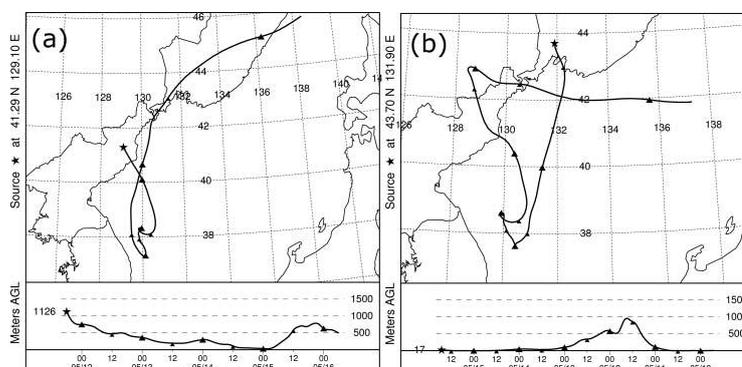


Рисунок 3. (а) Прямая траектория от полигона NKTS, начинающаяся в 1800 UTC 11 мая 2010 года, во временном интервале события деления Де Геера, но через 12 часов после наилучшей оценки. Отметим, как траектория поворачивает к северу около 14 мая 2010 года и проходит почти точно над Уссурйском во время сделанного там первого обнаружения La-140, то есть между 0144 UTC 15 мая и 0144 UTC 16 мая 2010 года. Если именно так происходили обнаружения в Уссурйске, то можно предположить, что часть радионуклидов Ва/La, первоначально двигавшихся на юг, на пару дней задержалась в Японском море вблизи восточного побережья Корейского полуострова перед тем, как снова двинуться на север. Обратные траектории в Уссурйске показывают, что такое могло произойти. (б) Обратная траектория от Уссурйска, заканчивающаяся в 1700 UTC 15 мая 2010 года, то есть в течение первого периода забора образцов. Отметим, что между 11 и 12 мая 2010 года (приблизительным временем мгновенного выброса) траектория проходила вблизи подозреваемого северо-корейского испытательного полигона на приблизительно правильной высоте. Она кружилась над Японским морем примерно между 13 и 14 мая, перед тем, как повернуть на север.

Обнаружения в Такасаки 15 – 19 мая поставили другую проблему: наблюдение Хе-135 18 мая без соответствующего обнаружения Хе-133 не позволяет понять, как такой сигнал мог возникнуть от единственного источника. Отношение Хе-135/Хе-133 (не скорректированное) было равно $\geq 4 \pm 2$, примерно такое же, как в Коджине

(и, может быть, даже больше), но сигнал был обнаружен на 4-5 суток позже, чем в Коджине. С другой стороны, отношения для трех предыдущих образцов в Такасаки составляли $\leq 0,13$, $\leq 0,12$ и $\leq 0,73$. Предполагая, что источник и происхождение выброса одинаковы, трудно будет представить себе сценарий, в котором отношение Хе-135/Хе-133 будет увеличиваться от одного дня к другому, если только более позднее обнаружение не будет связано с более ранним выбросом. Но такое объяснение подразумевает некоторый усложненный атмосферный перенос.

Далее, отношение Хе-135/Хе-133 в Такасаки 18 мая 2010 года не согласуется с выбросом от взрыва в любое из времен, обозначенных Де Геером. Например, для 48 часов – предлагаемого Де Геером времени для обнаружений в Такасаки – и в предположении роста от йода и других предшественников, первоначальное отношение Хе-135/Хе-133 будет примерно равно 1,4 как для высокообогащенного урана, так и для плутония (смотрите ниже «Расчеты активности и изотопных отношений ксенона»). Для регулярного выброса будет невозможно увеличивать такое отношение на пути от источника до приемника, и поэтому оно должно быть связано с более ранним выбросом, где начальное отношение будет намного большим. Но даже максимально возможное взрывное отношение – около 2500 от прямого деления U-235 примерно через 1 час после выброса – неделей позже превратится в отношение порядка 0,01. Отсюда можно сделать вывод, что по крайней мере обнаружения в Такасаки 18 мая 2010 года не были связаны с взрывом.

Кроме того, величина некоторых обнаружений Хе-133 в Такасаки, например, 15-16 мая и 18-19 мая, составляла примерно 0,2 мБк/м³, что, как предполагалось в нескольких опубликованных отчетах, соответствовало «нормальному» уровню фона в Такасаки и прилегающим к нему районам. Например, Игариши и др. предполагали, что уровень фона Хе-133 в Цукубе не превышает 1 мБк/м³, но случайные выбросы могут достигать 10 мБк/м³.¹⁹ Такасаки находится примерно в 100 км к северо-западу от Цукубы, и ожидается, что уровень фона ксенона будет примерно таким же из-за преобладающих ветров на равнине Канто, на которой расположены оба этих города²⁰. Еще позже Рингбом и др. по 1088 образцам, взятым в 2007 и 2008 годах, определили среднюю активность Хе-133 в 0,22 мБк/м³, с 95-м перцентилем в 0,58 мБк/м³.²¹ Однако, максимальное значение равнялось 4,77 мБк/м³, и отклонения $\geq 0,7$ были относительно обычными, что показывает, что даже обнаружения Хе-133 16–18 мая 2010 года в 0,5–1,5 мБк/м³ для Такасаки не были беспрецедентными. Тот же самый набор данных показывает, что обнаружение Хе-135 18 мая 2010 года также не было статистически аномальным для Такасаки (смотрите таблицу 1).

Таблица 1. Данные по фону ксенона-133 и -135 для станций Международной системы мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний на Корейском полуострове и поблизости от него. Средняя активность Хе-133 в Коджине взята из сообщений в средствах массовой информации, описывающих обнаружение 14 мая 2010 года как «в восемь раз большее, чем обычно». Значения 0,00 обозначают активность ниже минимально обнаружимой концентрации, обычно примерно равной 0,2 мБк/м³ для Хе-133 и в три-четыре раза большей для Хе-135. Для Кансонга данные не включают обнаружений, положительно отождествленных с ядерным испытанием 9 октября 2006 года, для которого активности Хе-133 составляли от 1,5 до 7,2 мБк/м³.

Станция, число образцов	Хе-133 Среднее	Хе-133 95 %	Хе-133 Максимум	
Коджин, РК, 3 года	~0,3	–	2,45	
Кансонг, РК, 82	0,24	–	0,90	
Такасаки, JРХ38, 1088	0,22	0,58	4,77	
Пекин, CNX20, 144	0,15	0,51	1,08	
Гуанчжоу, CNX22, 689	0,29	0,85	17,02	
УланБатор, MNX45,30	0,09	0,56	0,56	

Таблица 1 (продолжение).

Станция, число образцов	Хе-135 Среднее	Хе-135 95 %	Хе-135 Максимум	135/133
Коджин, РК, 3 года	–	–	10,01	$\leq 0,55$
Кансонг, РК, 82	0,00	–	–	–
Такасаки, JРХ38, 1088	0,00	0,33	0,56	–
Пекин, CNX20, 144	0,00	0,00	0,45	–
Гуанчжоу, CNX22, 689	0,03	0,28	0,95	–
УланБатор, MNX45,30	0,00	0,00	0,00	–

Более того, Хе-131m был обнаружен в Такасаки 15–19 мая 2010 года в 4 из 8 образцов, что обычно нехарактерно для ядерных взрывов из-за его относительно низкой вероятности образования. Например, в любое время до по крайней мере 48 часов после взрыва, предпочтительного времени выброса Де Геера для обнаружений в Такасаки, активность Хе-131m должна быть в по крайней мере в 100, 1 000 и 1 000 раз меньше, чем у

Xe-133m, Xe-133 и Xe-135 как для U-235, так и для Pu-239. К тому же, одно из этих обнаружений Xe-131m произошло в том же образце, где был обнаружен Xe-135, но не Xe-133 и Xe-133m. Кроме того, соответствующие отношения активностей лежат за пределами режима ядерного взрыва²². Рингбом и др. также показали, что обнаружение Xe-131m в Такасаки не является необычным; его средние, максимальные и 95-перцентильные активности соответственно равны 0,02 мБк/м³, 0,25 мБк/м³, и 0,09 мБк/м³, что охватывает значения, сообщавшиеся после предполагаемого ядерного испытания²³.

Такасаки также было единственным местом, для которого не было найдено ни одной обратной траектории, которая проходила бы над территорией Северной Кореи. Большая часть факела проходила над Японией, включая несколько суток циркуляции над равниной Канто или ее окрестностями. Прямая траектория от полигона NKTS, начинающаяся в 0600 UTC 13 мая 2010 года, через 48 часов после предполагаемого взрыва, как предполагал Де Геер, не проходит над Такасаки, в отличие от прямых траекторий, рассчитанных для Окинавы и Коджина. Активность ксенона и соображения по отношениям интенсивностей, так же, как и моделирование атмосферного переноса, позволяют сделать вывод, что большая часть, или даже все обнаружения в Такасаки, вряд ли возникли в результате ядерного взрыва на полигоне NKTS.

Возможное происхождение выброса радионуклидов вне Северной Кореи

После демонстрации того, что полигон NKTS является хорошим кандидатом для происхождения обнаружений на Окинаве, в Коджине, и Уссурийске, остается проверить другие возможные варианты за пределами Северной Кореи. Эта оценка включает возможные невзрывные источники, поскольку большинство соседних стран не обладают ядерным оружием, и Северная Корея – это единственная страна в регионе с недавней активной программой ядерных испытаний.

Сейчас появилось несколько исследований, сравнивающих теоретические и наблюдаемые отношения изотопов ксенона для различных применений деления ядер, таких, как генерация электроэнергии, производство медицинских изотопов, и взрывы²⁴. Только с двумя обнаруженными изотопами и одним хорошо установленным отношением невозможно однозначно приписать данные по ксенону в Коджине к сценарию взрыва. Тем не менее, такое объяснение довольно привлекательно, поскольку зарегистрированные уровни активности намного превышают обычный фон, не только в Коджине, но и на ближайших станциях Международной системы мониторинга к западу и к востоку.

В таблице 1 показаны соответствующие данные по фону изотопов ксенона на станциях Международной системы мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, которые окружают Корейский полуостров, а также двух национальных станциях Республики Корея. Данные получены из различных источников²⁵. Количество образцов на станциях в Пекине и Улан-Баторе неидеально; оно соответствует нескольким месяцам данных, или менее, и эквивалентные количества данных для станции RUX58 в Уссурийске также весьма желательны. Но, даже несмотря на эти ограничения, можно сделать очевидный вывод, что обнаружения в Коджине в мае 2010 года уникальны как в локальной, так и в региональной перспективе. Оно предполагает, что все то, чтобы не привело к этим обнаружениям, отражает исключительное событие в этой части мира, несмотря на присутствие такого большого количества установок ядерного топливного цикла.

Далее, глобальный набор данных по ксенону из Международного эксперимента по инертным газам (INGE), сообщенные Калиновски и др., показывает, что обнаружения и верхние пределы в Коджине уникальны²⁶. Например, логарифмическое среднее Xe-135/Xe-133 равно 0,05, по сравнению с наблюдаемым в Коджине отношением около 4,1. Кроме того, отношение верхних пределов с двумя необнаруженными изомерами подчеркивает их аномальный статус, в смысле их дальнейшего удаления от основной группы.

Выбросы из предприятий, изготавливающих медицинские изотопы

В регионе рядом с Корейским полуостровом нет никаких больших (по мировым стандартам) установок, изготавливающих медицинские изотопы (MIPFs), в которых мишени из низко обогащенного урана или высокообогащенного урана облучаются в течение нескольких дней и впоследствии растворяются в кислоте для извлечения Mo-99. Такие установки вместо этого располагаются в Канаде, Южной Африке, Бельгии, и Нидерландах; на них в общей сложности приходится около 96 процентов общемирового производства Mo-99²⁷. Тем не менее, реактор HANARO мощностью 30 МВт (тепл.) и связанная с ним установка для производства медицинских изотопов располагается неподалеку от Коджина (именно, в Тэджоне в Южной Кореи), и можно предположить, что другие такие установки имеются в Китае и Японии.

Во время облучения мишени из низко обогащенного или высокообогащенного урана отношение Xe-135/Xe-

133 уменьшается от 10 – 100 в первые несколько часов до менее 2 – 3 сразу же после конца облучения. Указанные диапазоны соответствуют различным условиям облучения, таким, как поток нейтронов, обогащение материала мишени, и длительность облучения. Охлаждение в течение одного или двух дней перед растворением еще больше уменьшает это отношение²⁸. Любой выброс достаточной для регистрации на удаленном детекторе инертных газов активности, вероятно, произойдет после растворения. Поэтому максимальное ожидаемое отношение Xe-135/Xe-133 уже будет меньше наблюдавшегося отношения в Коджине.

Последние исследования, направленные на обнаружение ксенона, выделяющегося из хранилищ отходов на установках для производства медицинских изотопов, на расстояниях от нескольких километров до нескольких сотен километров, обычно показывают очень низкие отношения Xe-135/Xe-133 по сравнению с сигналом в Коджине. Например, в трех образцах от ноября 2008 года, взятых около хранилища отходов радиофармацевтической установки ANSTO в Сиднее, Тинкер и др. наблюдали отношения Xe-135/Xe-133 в диапазоне от 0,004 до 0,072, а в десяти образцах, взятых в Мельбурне, на расстоянии примерно в 500 км, в течение следующих нескольких месяцев максимальное отношение Xe-135/Xe-133 равнялось 0,16, и максимальная активность Xe-135 равнялась $0,33 \pm 0,15$ мБк/м³.²⁹ В семи из десяти измерений были получены только верхние пределы. Аналогичные результаты были получены Сейем и др. на установке «Радиоизотопных продуктов ядерной технологии» в Пелиндабе, Южная Африка, и на установке Института Радиоэлементов во Флерюсе, Бельгия³⁰. Это позволяет предполагать, что крайне маловероятно считать, что одиночный выброс из установки для производства медицинских изотопов может объяснить данные наблюдений в Коджине.

ВЫБРОСЫ ИЗ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В то время как отношение Xe-135/Xe-133 и индивидуальные активности в Коджине регионально уникальны и глобально нетипичны, они не обязательно глобально уникальны. В ядерных реакторах, работающих в неравновесных режимах, например, в периоды включения и выключения, отношения Xe-135/Xe-133 превышают 1. Калиновски и Пистнер обнаружили, что это отношение было равно 65 в первом часу первого цикла реактора на легкой воде с топливом, обогащенным до 3,2 – 4,5 процента, и что это отношение постепенно уменьшалось до равновесного значения примерно в 0,25 в течение одного-двух месяцев³¹. Расчеты, проведенные для данного исследования, в целом согласуются с этой картиной, хотя они показывают, что потребуется примерно 2,25 часа для достижения уровня 65 (смотрите раздел «Расчеты активности и изотопных отношений ксенона»). Сообщалось, что максимальное соотношение Xe-135/Xe-133 в выбросах реактора примерно равно 70, что соответствует ожиданиям³².

Изменение изотопного отношения со временем после выброса может быть использовано для наложения правдоподобного ограничения на максимальное расстояние между местоположениями выброса и обнаружения. С соответствующими индивидуальными временами полураспада для Xe-135 и Xe-133, равными 9,14 часа и 5,24 суток, эффективный «период полураспада» для отношения будет равен 9,855 часа. Для того, что начальное соотношение, равное 70, уменьшилось до примерно 4,1, потребуется приблизительно 40,5 часов (прирост от превращения Xe-133m в Xe-133 и Xe-135m в Xe-135 внесет небольшую поправку, увеличив время примерно до 41 часа). При средней скорости ветра в 20 км/час факел переместится более, чем на 800 км. При консервативной оценке следует рассматривать только те реакторы, которые удалены от Коджина и от Окинавы, менее, чем на 1200 км. Ниже рассматриваются только реакторы, расположенные в Японии, Южной Корее, континентальном Китае, Тайване и России.

Японию почти определенно можно будет вычеркнуть из списка мест происхождения обнаружения ксенона в Коджине, учитывая, что преобладающие в этой части света ветры почти всегда направлены с запада на восток. Это было ярко продемонстрировано тем, что после аварии в Фукусиме первое обнаружение в Южной Корее было сделано 28 марта 2011 года. Это означает, что большая часть зарегистрированной в Республике Корея радиоактивности двигалась вокруг земного шара, а не прямо через Японское море³³. Даже в таком случае, учитывая потенциальную значимость тайного северокорейского ядерного испытания, будет благоразумно проверить японское происхождение для периода обнаружений.

Одним из кандидатов источника радиоактивного выброса в Японии мог быть запуск японского реактора на быстрых нейтронах Монжу 6 мая 2010 года; критичность реактора была достигнута 8 мая³⁴. Хотя реактор работал только на нулевой мощности, в течение нескольких последующих дней прозвучали аварийные сигналы нескольких типов, в том числе от измерителей кислорода, детекторов утечки натрия, детекторов радиации и датчиков температуры. По мнению операторов, все эти сигналы оказались ложными и были связаны с проблемами соответствующей измерительной аппаратуры. Маловероятно, что в реакторе возникла какая-либо проблема, которая могла бы вызвать существенный (или вообще любой) утечки радиоактивности.

Тем не менее, совпадение по времени было «подозрительным», так что на рисунке 4а показаны прямые

траектории, выходящие из Монжу, начиная с 0000 UTC 7 мая 2010 года, и повторяющиеся через каждые 12 часов в течение нескольких последующих дней. Одна траектория проходила над Окинавой, но она началась намного раньше начала временного интервала события деления (включая интервалы ошибок), определенного Де Геером на данным Ва/La-140 с Окинавы. Поскольку траектории никогда не проходили над Корейским полуостровом, детектор в Коджине не мог бы зарегистрировать никакого сигнала.

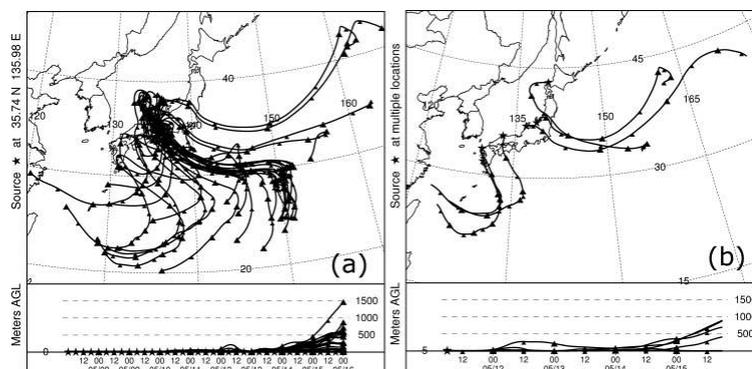


Рисунок 4. (а) Прямые траектории от реакторов на быстрых нейтронах в Монжу, Япония, начиная с 0000 UTC 7 мая 2010 года, и повторяющиеся через каждые 6 часов с высоты над уровнем моря в 100 метров. (б) Прямые траектории для шести площадок в Японии с несколькими ядерными реакторами (Томари, Кашивазаки, Шика, Шимане, Генкай и Сендай), начиная с 0600 UTC 11 мая 2010 года с высоты над уровнем моря в 100 метров. В этих расчетах использовались глобальные данные для повторного анализа. То, что эти комплексы реакторов практически охватывают Японию по длине и ширине, позволяет предположить, что траектории от других комплексов энергетических реакторов в Японии будут проявлять аналогичное поведение.

На рисунке 4б показаны прямые траектории от других шести площадок в Японии с несколькими ядерными реакторами, начиная с 0600 UTC 11 мая 2010 года, номинального времени события деления, рассчитанного Де Геером. Траектории, начинающиеся от 0000 UTC 10 мая 2010 года до 1200 UTC 14 мая 2010 года, перекрывающие интервалы ошибок времени события деления, проявляют очень похожее поведение. Факелы проходят над Окинавой примерно во время первых обнаружений, но опять не достигают Корейского полуострова.

Второй возможный набор источников находится в Южной Корее. Траектории, рассчитанные для периода времени от 0000 UTC 10 мая 2010 года до 0000 UTC 12 мая 2010 года, охватывающего время события деления и его временные ошибки, от южнокорейских комплексов ядерных реакторов в Йонгванге, Кори, Волсенге, и Ульжине проходят над Окинавой через несколько дней. Но, как показано на рисунке 5а, они всегда проходят приблизительно на сутки раньше, чем это следует из обнаружений Ва-140 и La-140. Рисунок 5б показывает, что траектория от Ульжина около 12–13 мая проходит над Коджином, или около него, но несколько позже, чем это следует из обнаружений ксенона. Ульжин находится на восточном берегу Южной Кореи, и он является самым близким комплексом энергетических реакторов от Коджина, включающим шесть реакторов с водой под давлением с мощностью 1 000 МВт (эл.). Исследовательский реактор HANARO мощностью 30 МВт (тепл.) и связанная с ним установка для производства медицинских изотопов не могут быть связаны с возможным источником обнаружений ксенона.

Китайские комплексы энергетических реакторов в Тяньване и Циньшане располагаются довольно близко от Коджина и Окинавы, что позволяет рассматривать их как возможные места происхождения³⁵. Кроме того, Китайский усовершенствованный исследовательский реактор (CARR) мощностью 65 МВт (тепл.) в Пекине, как сообщают, достиг критичности 13 мая 2010 года³⁶. Это датируемое более поздним числом время события деления Де Геера достаточно близко к тому, чтобы рассматривать его как возможное, поскольку процесс достижения критичности реактора вполне мог начаться несколькими днями ранее. Однако, во всех трех случаях траектории, рассчитанные для временного интервала события деления Де Геера либо не проходят рядом с Коджином или Окинавой, либо отделены от наблюдений несколькими днями, и (или) находятся на высоте, которая фактически делает их ненаблюдаемыми. Например, из сотен рассчитанных траекторий только одна (из Пекина) проходит рядом как с Коджином, так и с Окинавой. Одна она начинается в самом раннем пределе интервала Де Геера, и достигает Коджина за два дня до реального обнаружения.

Другим возможным местом происхождения в Китае может быть военно-морская база рядом с Далянем, где, по слухам, на атомной подводной лодке в конце июля 2011 года произошла утечка радиации³⁷. Начиная примерно с 1200 UTC 8 мая до 1200 UTC 9 мая 2010 года можно построить траекторию, которая проходит над

Коджином, или рядом с ним. Однако для набора данных GDAS время начала ограничивается несколькими часами около 1800 UTC 8 мая, а время прохода будет по крайней мере на два дня ранее реального обнаружения ксенона, и высота траектории будет близка к 1 500 метрам. Для набора глобальных данных для повторного анализа будет больше гибкости во времени начала траектории, но время прохода может быть на один день позже, или на один день раньше, в зависимости от точного времени начала. Для тех траекторий, в которых сигнал может быть детектирован вовремя, возраст факела будет равен 4 суткам, что равняется примерно 10 периодам полураспада Хе-135. Кроме того, будет трудно увидеть, как могут произойти обнаружения на Окинаве, поскольку траектории, начинающиеся во временном интервале события деления, не подходят ближе, чем на 500 км, и появляются либо раньше наблюдений, либо позже их.

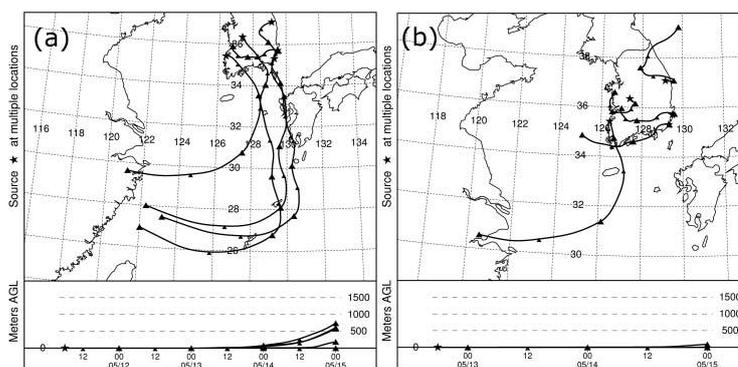


Рисунок 5. (а) Прямые траектории от всех четырех комплексов ядерных реакторов Республики Корея и исследовательского реактора HANARO, начинающиеся в 0600 UTC 11 мая 2010 года на высоте в 100 м над уровнем моря. Ни одна из траекторий, начинающихся во временном интервале событий деления Де Геера, не проходит рядом с Коджином. Траектория от любого из трех реакторных комплексов проходит прямо над Окинавой, но примерно на один день раньше наблюдений. Ни одна из траекторий не проходит вблизи от Коджина. (б) Прямые траектории от всех четырех комплексов ядерных реакторов Республики Корея и исследовательского реактора HANARO, начинающиеся в 1800 UTC 12 мая 2010 года на высоте в 100 м над уровнем моря. Траектория от комплекса в Ульжине на восточном побережье проходит рядом с Коджином, но позже времени наблюдений. Траектория от реактора HANARO и его установки для производства медицинских изотопов не проходит рядом с Коджином. В этих расчетах использовались глобальные данные для повторного анализа.

Были проверены возможные места происхождения, связанные с комплексами энергетических реакторов в Цзиньшане, Куошене и Мааньшане на Тайване. Во всех случаях траектории, рассчитанные для временного интервала события деления, и за двое суток до него, не пересекаются с Корейским полуостровом, в то время как несколько траекторий, проходящих вблизи Окинавы, обычно на несколько суток смещены от наблюдений и (или) поднимаются на высоту, намного большую, чем у станции Международной системы мониторинга.

Последней из рассмотренных возможностей была российская военно-морская база в Большом Камне около Владивостока, где, как сообщают базировались, или списывались атомные подводные лодки. Учитывая относительную близость Большого Камня к полигону NKTS, и успех моделей траектории для полигона NKTS, этот вариант, вероятно, является наиболее подходящим из всех альтернативных местоположений на основании чисто метеорологических соображений.

Траектории из Большого камня, начинающиеся рано утром 10 мая, поначалу движутся на запад, после чего поворачивают на юг, но они не подходят к Коджину ближе, чем на 200 км, и в это время возраст факела достигает по крайней мере 3 суток, или восьми периодов полураспада Хе-135. Кроме того, некоторые траектории, которые первоначально двигались в сторону суши, возможно, привели бы к более сильному сигналу на ближайшей станции (около 100 км) Международной системы мониторинга в Уссурийске, чем тот, который был обнаружен. С 11 по 14 мая траектории перемещались в Японское море, и затем на саму Японию, относительно близко к станции в Такасаки, где, вероятно, они бы вызвали более сильный сигнал, тем тот, который был обнаружен в самом деле. Некоторые из этих траекторий двигались по петле и проходили над Окинавой, или вблизи нее, но это происходило намного позже, чем первое обнаружение на этой станции. Поэтому выброс из реактора подводной лодки в Большом Камне остается возможным, но мало вероятным.

Представленный в этом разделе анализ приводит к выводу о том, что утечка (или утечки) радиоактивности

из ядерного реактора, или установки для производства медицинских изотопов вряд ли будет причиной обнаружения Ba/La на Окинаве или ксенона на Коджине. Это следует не только из результатов моделирования траекторий, но и из-за весьма необычной природы обнаружений по сравнению с историческими данными. Этот вывод в особенности справедлив, если предположить, что обнаружения на Окинаве и в Коджине в конечном счете связаны с выбросами в одном и том же местоположении источника, даже если они были разделены по времени. Потенциальные решения, не связанные с полигоном NKTS несколько натянуты. Только один комплекс энергетических реакторов, Ульджин в Республике Корея, и один комплекс судовых реакторов, Большой Камень вблизи Владивостока, возможно (но хотя и с трудом), могут быть источниками для обеих наборов обнаружений, на основании метеорологических траекторий. Но для этого потребуются многократные утечки (или длительная утечка) на протяжении нескольких суток, возможно, указывающие на проблему с одним из реакторов.

Кроме того, как отметил Де Геер, если причиной будет утечка реакторного топлива, то следует ожидать, что обнаружения Ba/La-140 на Окинаве (и в Уссурийске) будут сопровождаться радиоактивными пылевыми частицами, такими, как соединения йода. Также маловероятно, что будет происходить утечка только инертных газов, подобных Xe-140, поскольку это предположительно может случиться на других реакторах во всем мире, что сделает Ba-140 и La-140 намного более часто обнаруживаемыми частицами на станциях обнаружения пылевой составляющей Международной системы мониторинга. Также, как подтверждают некоторые цитированные выше примеры, утечки из реактора – это такие события, которые трудно долго удерживать в секрете.

Расчеты активности и изотопных отношений ксенона

Для того, чтобы определить возможные характеристики источника выброса, были рассчитаны активности ксенона и дочерних ядер для Pu-239 и U-235, как возможных расщепляющихся материалов, и для деления, индуцированного как быстрыми, так и тепловыми нейтронами. Для деления быстрыми нейтронами концентрации рассчитывались для одиночного мгновенного события, порождающего каждый тип осколков деления, то есть взрыва; затем радиоактивный распад и накопление рассчитывались с помощью уравнений Бейтмена. Предполагалась максимальная мощность взрыва в 200 тонн тротилового эквивалента, чтобы была возможность согласованности с заявлением Северной Кореи о «синтезе»³⁸. Тем не менее, все изотопные соотношения не зависят от мощности взрыва, поскольку активности линейно зависят от мощности, по крайней мере приблизительно, при одном и том же энергетическом спектре нейтронов. Для тепловых нейтронов концентрации рассчитывались в присутствии непрерывного потока нейтронов, то есть, потока, представляющего ядерный реактор; затем учитывались радиоактивный распад и накопление, и захват тепловых нейтронов, создающий и уничтожающий определенные изотопы. Были использованы стандартные уравнения для цепочек с многими членами³⁹.

Цепочки продуктов деления и ядерные данные (например, периоды полураспада, выходы продуктов деления, коэффициенты разветвления, поперечные сечения захвата нейтронов) были получены из различных источников⁴⁰. Большинство библиотек выходов продуктов деления построены для моноэнергетических нейтронов, что является упрощением реальной ситуации. Кроме того, некоторые библиотеки относят выходы от деления быстрыми нейтронами к энергии 400 кэВ, в то время как другие используют 500 кэВ. Поэтому для согласованности, и если не указано иное, во всех представленных здесь расчетах используются выходы продуктов деления из Проекта изотопов Берклиевской национальной лаборатории имени Лоуренса (LBNL), чьи истоки относятся к статье Ингланда и Райдера⁴¹, и которые базируются на выходах из Evaluated Nuclear Data File (ENDF) B-VI⁴².

Цепочки радиоактивных распадов начинаются с Sn-131 для Xe-131m, Sb-133 для Xe-133m и Xe-133, и Te-135 для Xe-135m и Xe-135. Во всех случаях период полураспада предшественника не превышает 2 секунд, так что предполагается, что накапливаемое деление относится к первому члену цепочки, а прямое деление – к другим членам. Поскольку предполагается, что обнаружения Cs-137 и Ba/La-140 на Окинаве возникли от мгновенного, или, по крайней мере, очень быстрого выброса, их цепочки начинаются с первого возможного продукта деления для этого массового числа (Sb-137 и Te-140, с периодами полураспада 0.478 с и 0.894 с, соответственно). Прямое, или независимое, деление поэтому рассматривается для всех членов цепочки.

Полная концентрация ксенона получается сложением всех возможных путей к соответствующему изотопу, число которых равно 11 для Xe-131m, 8 для Xe-133m, 16 для Xe-133, 3 для Xe-135m, 6 для Xe-135, 4 для Xe-137 и 3 для Xe-140. В случаях Xe-137 и Xe-140 для работы ядерного реактора включается также излучение запаздывающих нейтронов для членов цепочки с массами 138 и 141, требующих включения двух и одного дополнительных путей соответственно (хотя полные концентрации Xe-137 и Xe-140 при включении этих дополнительных путей изменятся очень мало).

Массы 137 и 140: обнаружения на Окинаве

Согласно обнаруженным на Окинаве концентрациям в таблице 1 из статьи де Геера, отношение активностей Ba-140/Cs-137 примерно равно 182 и 145 в первом и пятом образцах, в которых наблюдались максимальные активности и наилучшие отношения сигнала к шуму. Единственный другой образец, взятый во второй день, показал отношение 95 ± 45 , что соответствовало максимуму и минимуму в 166 и 62, соответствующим интервалам ошибок индивидуальных активностей. При экстраполяции к моменту события деления первоначальное отношение должно быть примерно равно 230. В предположении, что все Xe-140 и Xe-137 распадаются в свои дочерние изотопы Ba-140 и Cs-137 без последующего фракционирования, при прямом делении в два изотопа ксенона рассчитанное отношение Ba-140/Cs-137 будет равно 634 для U-235 и 383 для Pu-239. Предположение «отсутствия фракционирования» должно быть относительно безопасным, поскольку периоды полураспада ксенона так коротки (так же, как и период полураспада промежуточного Cs-140), и поэтому для возникновения фракционирования будет мало времени. Для кумулятивного деления в Xe-140 и Xe-137 соответствующие отношения равны 388 и 256 для U-235 и Pu-239 соответственно.

Наблюдаемое отношение в несколько сотен согласуется с взрывным происхождением. В предположении, что аналогичные доли Xe-137 и Xe-140 покинут полость и войдут в факел, тот факт, что наблюдаемое отношение близко к его значению для Pu-239, позволяет предложить плутоний в качестве участвующего в цепной реакции материала. Однако, это не обязательно. Действительный выброс может не быть мгновенным в истинном смысле этого слова, но вместо этого он может задержаться на несколько секунд или даже на несколько десятков секунд. В некоторых событиях в исторической программе испытаний США были такие короткие задержки перед выбросами⁴³. Учитывая короткие периоды полураспада, даже короткая задержка изменит изотопное отношение ксенона, предоставляя время для накопления предшественника. Например, период полураспада предшественника I-137 равен 24,5 секунды по сравнению с 0,86 секунды для I-140.

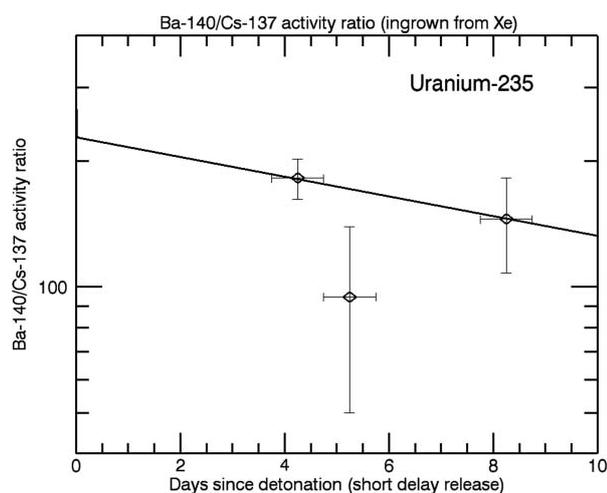


Рисунок 6. График временной зависимости отношения активности бария-140/цезия-137 для выброса, происшедшего через 17,3 секунды после взрыва с ураном-235 в качестве расщепляющегося материала, с использованием библиотеки выхода продуктов деления ENDF/B-VI. Выброшенные изотопы инертных газов ксенона-137 и ксенона-140 быстро распадаются до своих дочерних изотопов цезия-137 и бария-140 (через цезий-140), которые затем конденсируются на пылевых частицах и в конце концов выпадают на Окинаву. Аналогичный график был получен для плутония-239, для согласования с отношениями для Окинавы выброс должен произойти через 8,9 секунды после взрыва. Горизонтальная полоска представляет 24-часовой период забора образца. Отношение для второго образца можно согласовать с моделью небольшой задержкой выброса еще на три секунды, или около того, и (или) предположением о том, что неопределенность отношения лучше представляется пределами ошибок индивидуальных активностей. На вертикальной оси отложено отношение активностей Ba-140/Cs-137, а по горизонтальной оси – время после взрыва (выброса с короткой задержкой).

Расчеты поведения Xe-137 и Xe-140 после взрыва показывают, что примерно через 17 секунд после взрыва U-235 отношение дочерних изотопов Ba-140/Cs-137 достигает 230. На рисунке 6 показана эволюция получающегося в результате отношения Ba-140/Cs-137 для газа, выброшенного после этого времени в сравнении с отношениями на Окинаве. Получено довольно хорошее соответствие, что подтверждает наблюдение Де Геера

того, что Ba и Cs вероятно, имеют одно и то же происхождение. Это позволяет предположить, что единственным физическим процессом, влияющим на отношение Ba-140/Cs-137 между источником и приемником, является радиоактивный распад, то есть, что отсутствует преимущественное обогащение или обеднение любого изотопа на их пылевом носителе в течение их путешествия длительностью в несколько суток. Для Pu-239 соответствующая задержка выброса равна примерно 9 секунд. В обоих случаях полная активность Ba-140 всего лишь примерно в 2 раза меньше, чем для прямого деления.

Задержка выброса на 10-15 секунд после образования во взрывном событии деления обоснована, учитывая отмеченное Де Геером отсутствие обнаружения Se-141, для которого период полураспада его предшественника Xe-141 составляет всего лишь 1,7 секунды. Более того, задержка выброса не может быть значительно большей, чем несколько десятков секунд, потому что в таком случае Xe-140 с периодом полураспада 13,6 секунды должен был бы почти полностью превратиться в свои дочерние ядра, которые после этого были бы захвачены в полости. Аналогичная методология была использована Перссоном для вывода, что между взрывом и выбросом пылевых частиц в подземном испытании в Семипалатинске 18 декабря 1980 года прошло менее 1 минуты⁴⁴. В этом случае пылевые частицы также были обогащены Ba/La-140 и Cs-137, так же, как в настоящем случае, так же, как и Sr-89 и Sr-90.

Альтернативным сценарием, который мог бы изменить изотопные отношения прямого деления, является фракционирование во время процесса конденсации газа на пылевых частицах, или сразу же после него. Например, если выброс действительно был мгновенным, то тогда различие между периодами полураспада Xe-137 и Xe-140 примерно в 17 раз могло бы привести к переменной «конверсии» газа в частицы для цепочек распада с массовыми числами 137 и 140. Если, например, относительно короткие времена полураспада в цепочке с массовым числом 140 приведут к тому, что пылевые частицы будут обеднены изотопами из этой цепочки, то тогда это может также объяснить соответствующее (и, возможно, даже большее) обеднение изотопами из цепочки с массовым числом 141 с еще более короткими периодами полураспада, включая отсутствие обнаружения St-141 в сигнале на Окинаве. Возможно, что такое обеднение может быть вызвано быстрым вымыванием пылевых частиц сразу же после выброса, которое может оказать пропорционально большее влияние на цепочки с массовыми числами 140 и 141 из-за промежуточных изотопов Cs-140 и Cs-141 между Xe и Ba-140 и Se-141. Однако, такие эффекты фракционирования под влиянием метеорологии должны действовать на очень коротких временных промежутках, то есть минутах, что кажется маловероятным. Сейчас недостаточно данных для того, чтобы различить сценарии изменения отношений от «быстрого, но задержанного выброса с накоплением промежуточных изотопов» и «мгновенного выброса с последующим фракционированием».

Выброс из реактора

Расчеты для реактора показали, что ксеноновые предшественники Cs-137 и Ba-140 не могут выбрасываться из реактора в режиме равновесия, для которого отношение Xe-140/Xe-137 примерно равно 0,60, а отношение дочерних изотопов Ba-140/Cs-137 примерно равно 30 (смотрите рисунок 7). Используемые усредненные по активной зоне параметры реакторов на легкой воде были такими: макроскопическое поперечное сечение деления $0,25 \text{ см}^{-1}$, поток нейтронов $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и объем топлива $1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^3$ (отметим, что это не объем активной зоны). Эти значения приемлемы как для реакторов с водой под давлением, так и для реакторов с кипящей водой (соответственно PWR и BWR) с мощностью 1 000 МВт (эл.), наиболее обычными типами в регионе. Эквивалентные параметры для судового реактора равнялись 10 см^{-1} , $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^3$, соответствующие российскому реактору модели КЛТ-40 мощностью 135 МВт (тепл.)⁴⁵. Равновесное соотношение достигается всего лишь через 30 минут работы реактора из-за коротких периодов полураспада изотопов ксенона.

Отношения для реактора сразу же после запуска аналогичны отношениям для взрыва. Однако, аргументы правдоподобия могут исключить запуск реактора в качестве источника Xe-137 и Xe-140, а поэтому и, Cs-137 и Ba/La-140 на Окинаве. Например, для того, чтобы получить аналогичное качественное соответствие данных отношений Ba/La-140/Cs-137 на Окинаве, как на рисунке 6, потребуется, чтобы выброс реактора произошел примерно через одну минуту после запуска. В этот момент полная активность ксенона в реакторе на легкой воде, или в судовом реакторе будет соответственно на один и два порядка меньше, чем от взрыва мощностью в 200 тонн. Поэтому для реактора, расположенного сравнительно близко от полигона NKTS, такого, как реактор на легкой воде в Ульджине в Республике Корея, или судового реактора в Большом Камне в России, параметры ксенонового источника должны будут составлять существенную долю, порядка нескольких процентов, или нескольких десятков процентов, от всего запаса в реакторе (смотрите следующий раздел о концентрациях в факеле). Это, вероятно, слишком велико для «не аварийного» сценария, и, по крайней мере для судового реактора, такая большая доля выброса инертных газов, вероятно, будет означать, что будут также выброшены и впоследствии обнаружены другие составляющие, такие, как йод. Надо сказать, что рассматриваемая модель

запуска реактора слишком проста, в том смысле, что реакторы не работают сразу же на полной мощности, и достаточно большой нейтронный поток достигается через несколько суток. Поэтому временная зависимость отношения Xe-140/Xe-137 и абсолютные активности будут более сложными, чем представлено здесь. Но совершенно не очевидно, что более точная модель сможет помочь, потому что начальные значения активности ксенона могут оказаться еще более низкими.

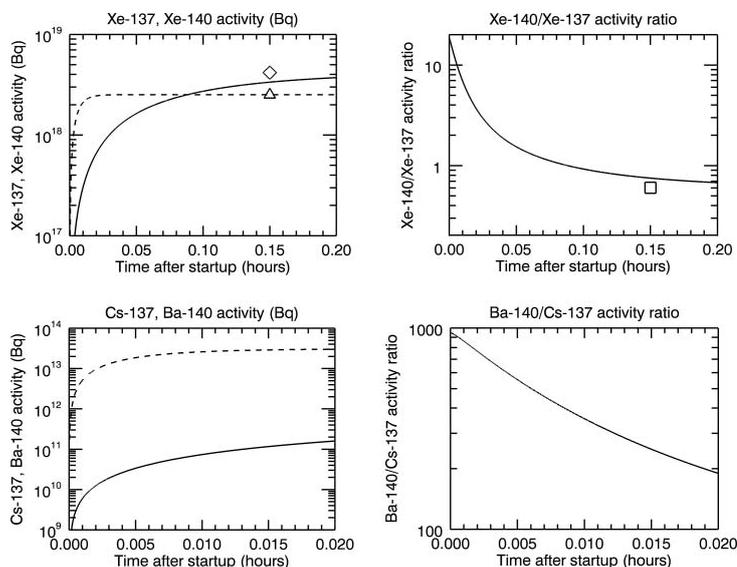


Рисунок 7. Расчеты для реактора на легкой воде полных активностей ксенона-137 (сплошная линия) и ксенона-140 (штриховая линия) и их отношения, и последующих дочерних изотопов цезия-137 и бария-140 для 72 секунд после запуска реактора. Открытые маркеры представляют равновесные значения. Важно отметить, что активности цезия-137 и бария-140 включают только те ядра, которые образовались от распада своих ксеноновых предшественников. Таким образом, хотя представленное здесь отношение ксенон-140/ксенон-137 должно быть хорошим представлением того, что находится внутри реакторного топлива, это не относится к отношению бария-140/цезия-137. Последняя характеристика служит приближением мгновенного отношения после выброса изотопов инертного газа ксенона из топливной матрицы. В расчетах использовалась библиотека выхода продуктов деления ENDF/B-VI. На горизонтальной оси всех рисунков отложено время до запуска реактора в часах. На вертикальной оси левого верхнего рисунка отложена активность Xe-137 и Xe-140 в беккерелях. На вертикальной оси правого верхнего рисунка отложено отношение активности Xe-140/Xe-137. На вертикальной оси левого нижнего рисунка отложена активность Cs-137 и Ba-140 в беккерелях. На вертикальной оси правого нижнего рисунка отложено отношение активности Cs-140/Ba-137.

Массы 133 и 135: обнаружения в Коджине

В последующих разделах мы увидим, что измерения активности Xe-133 и Xe-135 и их отношения в Коджине согласуются с взрывным происхождением. Кроме того, так же, как и измерения Ba/La-140 и Cs-137 на Окинаве, данные в Коджине не могут быть отнесены к работающему в равновесии тепловому реактору. Равновесное отношение Xe-135/Xe-133 для реактора на легкой воде примерно равно 0,22, и оно достигается примерно после 500 часов работы, в то время как наблюдаемое в Коджине отношение примерно равно 4,1 (смотрите рисунок 8). Это уже отмечалось Де Геером.

Однако, снова отношение для реактора после запуска аналогично ожидаемому от взрыва. Для того, чтобы согласовать его с отношениями, наблюдавшимися в Коджине, выброс, вероятно, должен был произойти в первые 1 – 25 часов эксплуатации. На рисунке 8 показано, что после 25 часов отношение Xe-135/Xe-133 падает ниже 5, в то время как наблюдавшееся в Коджине отношение примерно равно 5. Рисунок 8 также показывает, что до 1 часа отношение Xe-133m/Xe-133 больше или равно 0,2. Вероятно, это делает возможным обнаружение Xe-133m при наблюдавшейся в Коджине активности Xe-133 в 2,45 МБк/м³, учитывая их приблизительно аналогичные времена полураспада, и предполагая промежуток времени между выбросом и обнаружением равным всего нескольким суткам. Эти ограничения отличаются от рассмотренного выше варианта Xe-140/Xe-137, что делает сценарий одиночного выброса из реактора не согласующимся с данными измерений (хотя, как уже отмечалось, вычисления являются относительно упрощенными по сравнению с реальными процедурами запуска реактора).

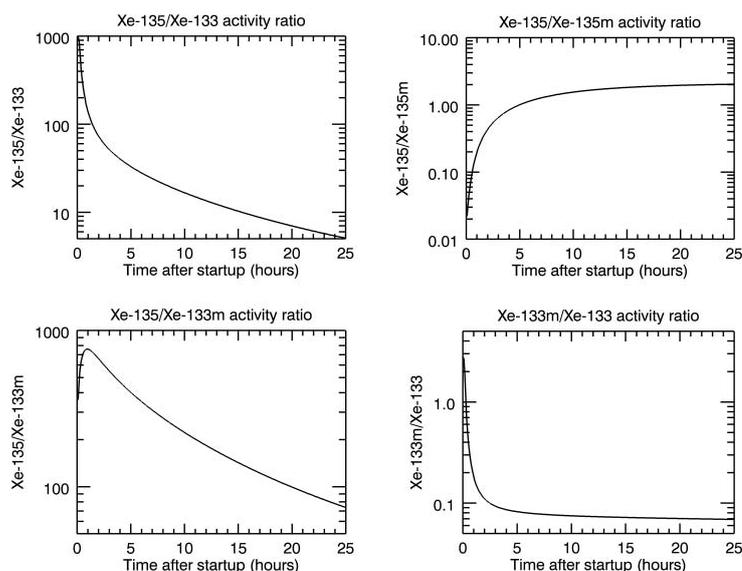


Рисунок 8. Расчеты различных отношений изотопов ксенона в течение первых 25 часов эксплуатации. В расчетах использовалась библиотека выхода продуктов деления ENDF/B-VI. На горизонтальной оси всех рисунков отложено время до запуска реактора в часах. На вертикальной оси левого верхнего рисунка отложено отношение активности Xe-135/Xe-133. На вертикальной оси правого верхнего рисунка отложено отношение активности Xe-135/Xe-135m. На вертикальной оси левого нижнего рисунка отложено отношение активности Xe-135/Xe-133m. На вертикальной оси правого нижнего рисунка отложено отношение активности Xe-133m/Xe-133.

КОНЦЕНТРАЦИИ В ФАКЕЛЕ

Предшествующий анализ простых прямых и обратных траекторий и трудность поиска жизнеспособных сценариев и местоположений выброса из реакторов предоставляет сильное, при отсутствии доказательств в пользу противного, свидетельство ядерного испытания, проведенного на полигоне NKTS, или рядом с ним, около 0600 UTC 11 мая 2010 года. Почти немедленный выброс инертных газов сопровождался появлением дочерних продуктов Ba-140, La-140 и Cs-137, обнаруженных на Окинаве, и, возможно также, сигналов Ba-140 и La-140 в Уссурийске. Второй выброс инертных газов, происшедший примерно на 36 часов позже, привел к обнаружению Xe-135 и Xe-133 в Коджине. Хотя нельзя полностью исключить двух отдельных выбросов из реактора – будь то из одного и того же реактора в разные моменты времени, или двух полностью различных реакторов – у правдоподобия такого сценария возникают несколько связанных с ним серьезных проблем.

Однако, использование одиночной траектории для заключения по прямой связи между источником и приемником проблематично, потому что одиночная траектория – это всего лишь центральная линия движущейся воздушной массы, подверженной как горизонтальной, так и вертикальной дисперсии. Таким образом, хотя путь воздушной массы предоставляет полезную качественную информацию, для получения количественной информации необходимо применять более сложные модели атмосферной дисперсии. В следующем разделе расчеты активности ксенона будут комбинироваться с моделями концентрации факела по программе HYSPLIT для ограничения параметров источника и получающихся долей выброса инертных газов. Они будут использоваться для оценки согласованности с обнаруженными активностями радионуклидов.

Барий-140

На рисунке 9 показаны результаты расчета факела для обнаружения Ba-140 на Окинаве. Факел начинается на полигоне NKTS в номинальное время взрыва в 0600 UTC 11 мая 2010 года со скоростью выброса активности в $3,6 \cdot 10^{13}$ Бк/час Ba-140 в течение интервала в 1 минуту (чтобы получить выброшенную активность в $6,0 \cdot 10^{11}$ Бк)⁴⁶. Такой короткий интервал выброса диктуется необходимостью поддержания согласованности с наблюдаемым отношением активностей (так же, как и с самими активностями), который которое быстро уменьшается в

первую минуту после взрыва. Примерно через 17 секунд после взрыва U-235 и примерно через 9 секунд после взрыва Pu-239 (эти времена обеспечивают наилучшее согласие с наблюдаемым отношением активностей Ba-140/Cs-137) активность дочернего продукта Ba-140 будет примерно равна $2 \cdot 10^{14}$ Бк. Следовательно, доля в выбросе составит только около 0,3 процента, что согласуется с тем, чего можно было ожидать⁴⁷. Усредненное по 24-часовому интервалу в диапазоне высоты над уровнем моря от 0 до 30 м, это значение довольно хорошо объясняет величину наблюдаемой активности Ba-140 в правильное время.

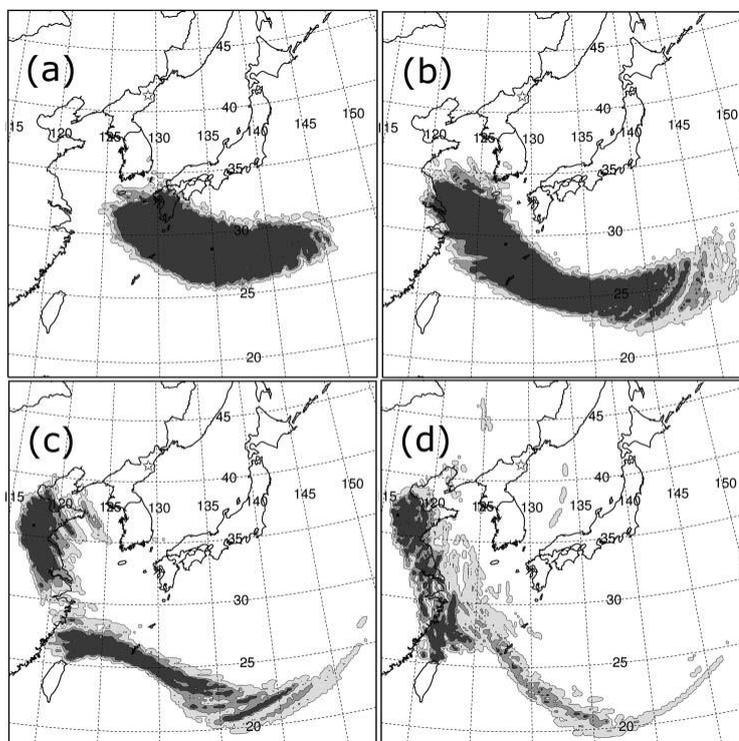


Рисунок 9. Расчет факела для бария-140 (дочернего изотопа для мгновенно выброшенного ксенона-140), начавшегося в 0600 UTC 11 мая 2010 года на высоте в 1 500 м над уровнем моря, соответствующего площадке северокорейского испытательного полигона и глобальным метеорологическим данным для повторного анализа. Интервалы интегрирования были такими: (a) 0000 UTC 14 мая – 0000 UTC 15 мая, (b) 0000 UTC 15 мая – 0000 UTC 16 мая, первый образец с обнаружением, (c) 0000 UTC 16 мая – 0000 UTC 17 мая, (d) 0000 UTC 17 мая – 0000 UTC 18 мая. Контурные линии уровней представляют концентрации >100 мкБк/м³, между 50 и 100 мкБк/м³ и между 5 и 50 мкБк/м³. Этот последний контур остается над Окинавой и в течение следующих 24 часов. Предсказанная активность над Окинавой примерно равна 100 мкБк/м³, что согласуется с наблюдаемой активностью в 81,9 мкБк/м³ в соответствующем временном интервале. Модель включает только сухое осаждение сферических частиц диаметром 1,0 мкм и плотностью 1,0 г/см³.

Модельный факел остается обнаружимым над Окинавой (с концентрацией выше 5 мкБк/м³) в течение 4 суток при сухом осаждении пылевых частиц, но только в течение около 2 суток при вовлечении влажного осаждения. Полное выключение осаждения (то есть рассмотрение факела как газообразного, а не пылевого), поддерживает концентрацию выше 10 мкБк/м³ еще в течение нескольких суток. В этом случае применима примерно в три раза меньшая доля выброса. Первые несколько суток модели факела довольно приемлемо отражают начальные наблюдения, а именно резкий подъем активности в начале обнаружения от 0 до 100 мкБк/м³, и затем уменьшение до нескольких десятков мкБк/м³ на следующий день. После этого концентрация постепенно уменьшается до не обнаружимых уровней, что противоречит данным, которые в течение 3 суток остаются постоянными на уровне 20 – 30 мкБк/м³, снова поднимаются до 40 – 50 мкБк/м³ на 2 суток, и затем быстро уменьшаются до примерно 5 мкБк/м³ в следующие 2 суток.

Таким образом, долговечность факела (8 суток) и, в особенности, второе возрастание на пятый день, не могут быть воспроизведены в построенных здесь относительно простых моделях факела. Обратные траектории от Окинавы могут предоставить ключ к разрешению этой дилеммы. Такие траектории, рассчитываемые в течение 8 суток от обнаружения факела, показывают пики и провалы в переводе на их чувствительность к

области около полигона NKTS. Иными словами, с 15 – 16 мая траектория проходит непосредственно над полигоном NKTS, или рядом с ним в номинальное время взрыва по Де Гееру, затем отходит от него в следующие трое суток, затем снова возвращается в окрестности полигона NKTS между 19 – 20 мая и временем взрыва, и снова уходит. Это качественно отражает наблюдаемое поведение взрыва.

Были также рассчитаны факелы для нескольких комплексов реакторов в Республике Корея и Японии. По той же самой причине, которая указывалась выше для случая взрыва, снова был выбран интервал выброса в одну минуту. Как и ожидалось из траекторий, показанных на рисунке 5, факелы от четырех комплексов энергетических реакторов в Республике Корея, так же, как и от реактора HANARO, приходят слишком рано (около 24 часов). Так происходит и когда выброс начинается в наилучший момент во временном окне события деления Де Геера, и когда он начинается на границах ошибок этого окна.

В случае Японии для времени начала в 0600 UTC 11 мая 2010 года, либо никакой факел не проходит прямо над Окинавой в правильное время, либо край факела скользит над Окинавой, или вблизи нее, и затем уходит, не оставаясь там в течение недели, или около того, как это видно из реальных данных. Аналогичное поведение наблюдается для других времен старта во временном окне события деления, так же как и в тех случаях, когда модельный факел приходит на день позже времени обнаружения, или около того, с профилем, который позволяет предположить более постепенное увеличение концентрации Ва-140 (например, для комплекса Шимане). Для комплекса реакторов Иката при времени начала примерно на 12 часов позже (но все еще в пределах ошибок события деления Де Геера) факел появляется над Окинавой в момент обнаружения. Но его временной профиль не соответствует наблюдениям; он уходит с Окинавы через одни сутки. Важно отметить, что реактор на быстрых нейтронах Монжу почти определенно исключается из перечня потенциальных источников обнаружений на Окинаве.

Для российской военно-морской базы в Большом Камне факел, начинающийся в 0000 UTC 11 мая, или после этого, с высоты в 25 – 300 м над уровнем моря не проходит над Окинавой до 18 мая, намного позже первых обнаружений; этот результат справедлив как при использовании набора глобальных данных для повторного анализа, так и набора данных GDAS. Однако, факел, начинающийся в 1200 UTC 10 мая (в пределах ошибок времени события), придет на Окинаву в правильное время.

Xe-135

На рисунке 10 показаны результаты расчетов факела для обнаружения Xe-135 в Коджине, начинающегося на полигоне NKTS во время взрыва $T + 36$ часов, то есть в 1800 UTC 12 мая 2010 года, как предполагалось Де Геером. Скорость выброса активности Xe-135 равнялась $1,0 \cdot 10^{13}$ Бк/час в течение 1 часа, с интегральной активностью выброса $1,0 \cdot 10^{13}$ Бк. В предположении обрезания предшественника на 36 часов, полная активность Xe-135 составляла примерно $6 \cdot 10^{15}$ Бк, как для U-235, так и для Pu-239, что соответствовало доле выброса всего около 0,2 процента, что согласуется с ожиданиями⁴⁸. Усреднение по 12-часовому интервалу в диапазоне высот над уровнем моря от 0 до 300 м воспроизвело величину наблюдавшейся активности Xe-135 в правильное время. Важно отметить, что модель предсказывает, что обнаружимые концентрации Xe-135, вероятно, не будут продолжать существовать над Коджином в течение последующих дней, оставаясь на уровне минимально обнаружимой концентрации $0,9$ мБк/м³, или меньше его.

Удивительно, но, несмотря на то, что модель прямой траектории показывает, что выброс из комплекса ядерных реакторов в Ульджине пройдет над Коджином, полный расчет концентрации факела показывает, что это не так. Это согласуется с первоначальными сообщениями средств массовой информации, цитировавшими заявления официальных лиц о том, что источники выброса не могут находиться в Республике Корея, потому что ветры дули на юг⁴⁹. Кроме того, было найдено, что факел от исследовательского реактора HANARO и его установки для производства медицинских изотопов не должен проходить над Коджином. В отличие от случая для Ва-140, ни одна из моделей факела Xe-135 от Большого Камня, начинающегося в любое время из интервала 0000 UTC 10 – 13 мая, не проходит над Коджином, а возраст всего того, что проходит ближе всего в пространстве и времени, превысит трое суток. Моделирование полной концентрации факела не проводилось ни для одного источника в Японии и Китае, поскольку ранее представленные модели траекторий показали, что там нет никаких подходящих площадок.

МЕХАНИЗМ ВЫБРОСА XE-135 И ИЗОТОПНЫЕ ОТНОШЕНИЯ

В модели Де Геера считается, что второй выброс состоял из так называемого первичного ксенона, то есть ксенона, который был мгновенно выброшен из полости взрыва, но перед выбросом через 36 часов после взрыва находился в изолированном туннеле или боковом штреке; может быть, выброс произошел в результате

вентиляции туннеля для извлечения экспериментального оборудования. Примеры такого типа выбросов определенно имелись в других программах ядерных испытаний⁵⁰. В этом случае не будет происходить никакого накопления от распада йода или других предшественников, и, вероятно, не ожидается никакого фракционирования. Первоначальные изотопные отношения могли изменяться только в результате радиоактивного распада.

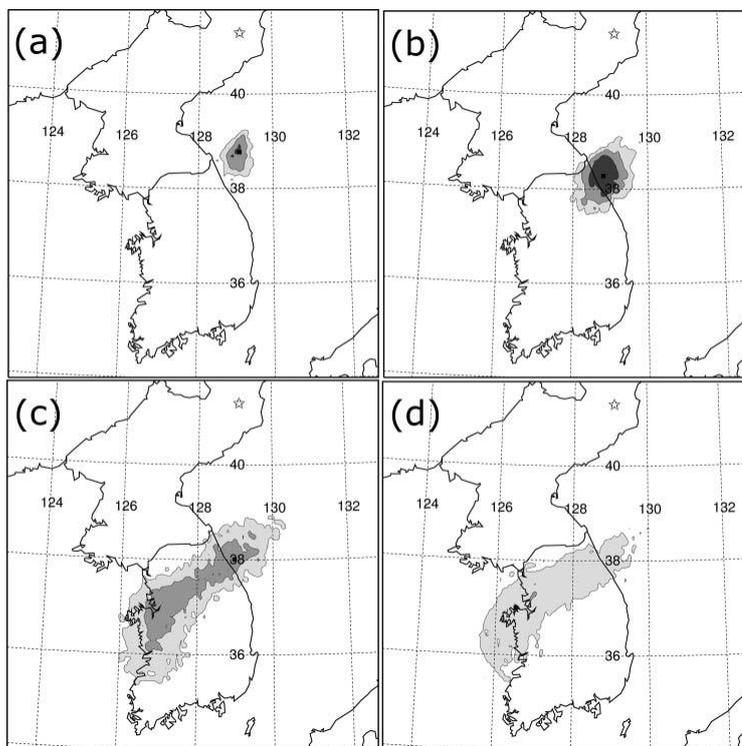


Рисунок 10. Расчет факела для ксенона-135, начавшегося в 1800 UTC 12 мая 2010 года на высоте в 1 500 м над уровнем моря, соответствующего площадке северокорейского испытательного полигона и глобальным метеорологическим данным для повторного анализа. Интервалы интегрирования были такими: (a) 2300 UTC 12 мая – 1100 UTC 13 мая, (b) 1100 UTC – 2300 UTC 13 мая, то есть интервал, в течение которого был обнаружен ксенон, (c) 2300 UTC 13 мая – 1100 UTC 14 мая, (d) 1100 UTC – 2300 UTC 14 мая. Контурные линии уровней представляют концентрации >20 мБк/м³, между 5 и 20 мБк/м³ и между 0,6 и 5 мБк/м³. Предсказанная активность в Коджине прекрасно согласуется с наблюдавшимся значением 10 мБк/м³ в соответствующем интервале времени.

С другой стороны, ксенон может быть не первичным, а выброшенным непосредственно из полости через 36 часов после взрыва как газ, нашедший свой путь к поверхности при коллапсе кратера, и впоследствии через трещины и расщелины – либо существовавшие ранее, либо открывшиеся при взрыве – в окружающих скальных породах. Такие задержанные выбросы также имели прецеденты в исторических программах испытаний, и им могли «помогать» проходы атмосферных образований с низким давлением⁵¹. В этом случае может произойти существенное накопление предшественников, а также возможное фракционирование, так что вместе с радиоактивным распадом на изменение первоначальных изотопных отношений могут влиять три процесса.

Третья возможность совмещает особенности двух предыдущих; здесь инертный газ выбрасывается в «удерживающую шахту» через несколько часов после взрыва, но затем выбрасывается в атмосферу только после продувки туннеля 32 – 34 часами позже. В этой модели может наблюдаться некоторое накопление предшественников, но, вероятно, из-за ограниченного доступного времени фракционирование будет либо небольшим, либо вообще отсутствующим. Представленные здесь расчеты активности позволяют провести проверку согласованности этих моделей.

Активность Хе-135 от прямого деления (то есть первичного ксенона, без накопления от предшественников) равна $7,3 \cdot 10^{14}$ Бк для U-235 и $3,8 \cdot 10^{15}$ Бк для Pu-239 при мощности взрыва 200 тонн. При отсечке предшественников в 10 – 20 секунд (времени выброса, определенного по наилучшему совпадению с отношением Ba-140/Cs137, наблюдавшемся на Окинаве) изменения будут очень малы. В предположении, что в «удерживающую шахту» будет выброшено до 1 процента инертных газов – правдоподобное значение с учетом доли в 0,3

процента, следующей из обнаружений на Окинаве и связанных расчетов факелов – соответствующие активности будут равны $7,3 \cdot 10^{12}$ Бк для U-235 и $3,8 \cdot 10^{13}$ Бк для Pu-239. Впоследствии произойдет начальный всплеск активности Xe-135 от накопления из Xe-135m, так что приблизительные активности после 36 часов будут равны $1,2 \cdot 10^{12}$ Бк для U-235 и $5,9 \cdot 10^{12}$ Бк для Pu-239. Эти значения меньше, чем активность 10^{13} Бк, в действительности требующаяся в модели концентрации факела для объяснения обнаружения в Коджине, и поэтому они, вероятно, нереалистичны.

Для активности, достаточной для объяснения обнаружений в Коджине⁵², может понадобиться первичный выброс в «удерживающую шахту», в десять раз больший, чем для U-235, и в два раза больший, чем для Pu-239. Возможно, что это может произойти способом, предложенным Де Геером, а именно, что больший выброс состоял из газа, выброшенного из полости взрыва, но большей частью удерживаемого концевым уплотнением туннеля, в то время как меньший выброс состоял из газа, просочившегося сквозь уплотнение. В противном случае может потребоваться, чтобы произошли два отдельных первоначальных выброса с различными долями выброса, а именно, около 0,3 процента для немедленного вышедшего выброса, обнаруженного на Окинаве, и $\geq 2 - 10$ процентов для вышедшего с задержкой выброса, обнаруженного в Коджине. В любом случае необходимо, чтобы во время вентилизации туннеля было высвобождено близко к 100 процентам от удерживаемого ксенона.

Как в работе Де Геера, так и в том, что представлено здесь, имеются проблемы определения отношений активности Xe, обнаруженных в Коджине, с использованием как чисто первичного, так и чисто состаренного (то есть, с накоплением предшественника) ксенона. Проблема Де Геера состоит в том, что в его модели с первичным, но задержанным выбросом вместе с Xe-133 должен быть обнаружен Xe-133m. В самом деле, первоначальная активность Xe-133m выше, чем у самого Xe-133. Но в Коджине был измерен только верхний предел активности Xe-133m, с соответствующим верхним пределом отношения Xe-133m/Xe-133, равным, согласно Де Гееру, 0,077. В Коджине через 59 часов после взрыва (это интервал между 0600 UTC 11 мая и 1700 UTC 13 мая; последняя дата – это середина периода забора образца) предсказанные отношения Xe-135/Xe-133 и Xe-133m/Xe-133 для первичного ксенона будут соответственно равны 16,5 и 1,6 для U-235 (и 7,2 и 1,6 для Pu-239). Расхождения в отношениях ксенона между данными измерений и его моделью заставили Де Геера постулировать, что первое испытание проводилось около 15 апреля, но после повторного рассмотрения данных и анализа этот постулат был отозван⁵³.

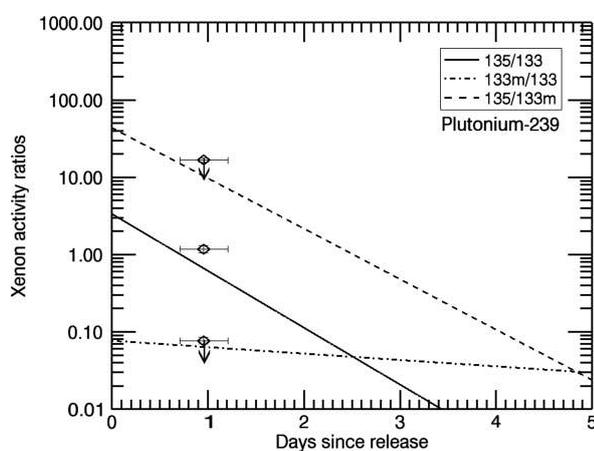


Рисунок 11. График отношений активности ксенона в Коджине через 23 часа после выброса из полости взрыва, который, в свою очередь, произошел через 36 часов после взрыва с последующим накоплением предшественника в течение этого времени. Горизонтальные отрезки у точек данных соответствуют 12-часовому периоду забора образцов в Коджине. Сплошная линия соответствует отношению Xe-135/Xe-133, штрих-пунктирная – отношению Xe-133m/Xe-133, штриховая – отношению Xe-135/Xe-133m. Расщепляющимся материалом был плутоний-239; в расчетах использовалась библиотека выхода продуктов деления ENDF/B-VI. По вертикальной оси отложены отношения активности изотопов ксенона, по горизонтальной – время в сутках после выброса.

Как уже отмечалось, в альтернативной модели время отсечки предшественника примерно соответствовало 36 часам после взрыва, когда ксенон был выброшен непосредственно из полости взрыва (или из кратера). На рисунке 11 показаны получившиеся отношения в сравнении с данными наблюдения в Коджине; в данном случае предполагалось деление ядер плутония-239 (хотя ситуация почти идентична и для U-235, за исключением более позднего времени). На этом и на последующем графиках первоначально опубликованное отношение Xe-

$^{135}\text{Xe}/^{133}\text{m}$ было исправлено тем же способом, как это было сделано Де Геером, для того, чтобы обеспечить достоверное сравнение с уравнениями Бейтмена. Очевидно, что предсказанное отношение $\text{Xe-135}/\text{Xe-133}$ слишком низко, в районе 0,66 в середине 12-часового интервала забора анализов в Коджине, по сравнению с наблюдавшимся (хотя и исправленным) значением 1.18 ± 0.12 . С другой стороны, два других отношения согласуются с наблюдавшимися верхними пределами.

Неидеальное соответствие отношения $\text{Xe-135}/\text{Xe-133}$ не обязательно делает эту модель несостоятельной. Есть достаточная свобода действий в выборе времен детонации и выброса, установлении их относительных неопределенностей, и в самом атмосферном моделировании, для того, чтобы привести рассчитанное отношение в удовлетворительное согласие с наблюдаемым значением. Например, даже трехчасовая задержка детонации до 0900 UTC 11 мая и соответствующая трехчасовая задержка выброса до 2100 UTC 12 мая приведет все отношения к согласию в пределах интервалов их ошибок. Кроме того, неопределенность в выходе каждого конкретного выхода продукта деления может быть относительно большой. Например, для библиотеки ENDF/B-VII.1 и деления U-235 быстрыми нейтронами для Xe-135 , Xe-135m , I-135, Te-135 and Sb-135 независимые выходы и их неопределенности соответственно равны $(1,20 \pm 0,28) \cdot 10^{-3}$, $(1,86 \pm 1,19) \cdot 10^{-3}$, $(3,60 \pm 0,29) \cdot 10^{-2}$, $(2,47 \pm 0,57) \cdot 10^{-2}$ и $(2,46 \pm 1,57) \cdot 10^{-3}$. Аналогичные уровни неопределенности наблюдаются в цепочке для массового числа 133. Поэтому кажется очевидным, что все неопределенности, вместе взятые, легко могут вызвать двукратное различие между предсказанными и наблюдавшимися отношениями $\text{Xe-135}/\text{Xe-133}$.

Кроме того, фракционирование между элементами продуктов деления в полости взрыва и кратере – это хорошо известное явление, относящееся к летучести и (или) жаростойкости конкретного продукта деления, его предшественникам, их периодам полураспада, и общей феноменологии взрыва⁵⁴. Например, было обнаружено, что Cs-137 и Sr-90, несмотря на их относительно низкую летучесть, обогащены над полостями ядерных взрывов и внутри так называемых кратерах коллапса (или, альтернативно, обеднены в сплавленной гряде обломков на дне полости). Так происходит потому, что их предшественники включают короткоживущие изотопы инертных газов Xe-137 и Kr-90, которые из-за их высокой летучести способны перемещаться на большие расстояния через трещины и щели во время фазы охлаждения полости.

Может показаться невероятным, что может существовать фракционирование изотопов ксенона. Тем не менее, периоды полураспада их трех непосредственных предшественников, а именно, йода, теллура и сурьмы, сильно различаются. Например, периоды полураспадов Sb-133, Te-133, Te-133m, и I-133, соответственно равные 2,5 минутам, 12,5 минутам, 55,4 минутам и 20,8 часам, намного длиннее периодов полураспада их аналогов с массовым числом 135, Sb-135, Te-135, и I-135, равных 1,68 секундам, 19,0 секундам, и 6,57 часам. Цепочка распада от сурьмы до ксенона направлена в порядке возрастания летучести, в которой йод в особенности весьма летуч и, следовательно, вероятно мобилен. В зависимости от временных и (или) пространственных профилей охлаждения в полости и кратере, относительно быстрое преобразование цепочки с массовым числом 135 в высоко летучие разновидности предлагает сценарий, в котором I-135 и Xe-135 могут мигрировать дальше, чем I-133 и Xe-133, и таким образом обогащаться в кратере. Такой сценарий может быть согласованным с заявлением Лэя и др. о том, что «предшественники теллур и сурьма ... неохотно высвобождают свои ксеноновые продукты деления»⁵⁵. Альтернативно, или в дополнение, для I-133 химические реакции между йодом и другими элементами получают больше времени для своего завершения, и образующиеся соединения будут, вероятно, менее мобильными, и будут захватываться под землей дочерний изотоп Xe-133. Эти процессы затем могут привести к относительно высокому отношению $\text{Xe-135}/\text{Xe-133}$, когда прохождение атмосферных образований низкого давления будет вытягивать газ из подповерхностных разломов и трещин в скальных породах. В поддержку аргумента в пользу того, что фракционирование может изменить изотопные отношения, может быть использовано описание применения ксенона в качестве диагностики характеристик устройства, утверждается, что ранний забор образцов (то есть, до коллапса полости) предпочтительнее, поскольку ксенон в основном приписывается своему независимому выходу⁵⁶. С другой стороны, интерпретация промежуточных по времени образцов «усложнена» и диагностическое применение ксенона «сомнительно».

Одно преимущество этой модели состоит в том, что она естественно объясняет низкое отношение $\text{Xe-133m}/\text{Xe-133}$. Хотя фракционирование может повлиять на их активности, оно очевидно не может изменить их отношения, поскольку оба изомера возникают из одной и той же цепочки распада продукта деления. Другое преимущество состоит в том, что для того, чтобы объяснить обнаруженную концентрацию, требуется относительно низкая доля выброса, несколько десятых долей процента от общего содержания ксенона. Поэтому нет никаких причин для ссылки на предыдущее испытание, для которого следует привлекать вопросы как правдоподобия, так и атмосферного моделирования.

Третья модель выброса для обнаружений в Коджине совмещает особенности двух предыдущих, но все же без необходимости привлечения предыдущего испытания. Если использовать U-235 в качестве расщепляющегося материала, и если выброс в «удерживающую шахту» произойдет примерно через 1,7 часа после взрыва с

последующим накоплением от предшественников, то все предсказанные отношения в Коджине 57,3 часами позже согласуются с данными измерений (смотрите рисунок 12). Соответствующее время выброса для Pu-239 будет равно 3,65 часа, но в этом случае отношение Xe-133m/Xe-133 будет примерно в 1,9 раза больше, чем измеренный верхний предел в 0,077. Этот результат вероятно не исключает Pu-239, потому что использование других библиотек выходов при делении быстрыми нейтронами может привести к большим вариациям популяций изотопов ксенона, и, как мы видели выше, могут быть большие неопределенности в индивидуальных выходах изотопов в любой одной конкретной библиотеке.

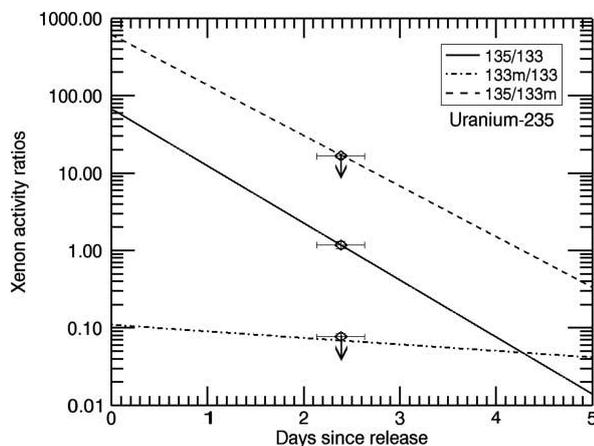


Рисунок 12. График отношений активности ксенона в Коджине, в предположении, что инертные газы были выброшены из полости в «удерживающую шахту» через 1,7 часа после взрыва, но выброс в атмосферу произошел на 34,3 часа позже. Отсечка предшественников также произошла через 1,7 часа. Сплошная линия соответствует отношению Xe-135/Xe-133, штрих-пунктирная – отношению Xe-133m/Xe-133, штриховая – отношению Xe-135/Xe-133m. Расщепляющимся материалом был уран-235; в расчетах использовалась библиотека выхода продуктов деления ENDF/B-VI. По вертикальной оси отложены отношения активности изотопов ксенона, по горизонтальной – время в сутках после выброса.

Для этой модели с ураном-235 по крайней мере 2 процента инертных газов должно быть выброшено в «удерживающую шахту» через 1,7 часа после взрыва. В это время активность Xe-135 равна $1,5 \cdot 10^{14}$ Бк. С учетом накопления от Xe-135m и распада активность через 34,3 часа, когда газ был выброшен в атмосферу, равна $1,1 \cdot 10^{13}$ Бк. Этого будет достаточно, чтобы объяснить обнаруженную в Коджине концентрацию, если предположить, что весь ксенон был выброшен в атмосферу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность необъявленного северокорейского испытания ядерного оружия в мае 2010 года считается спорной, в основном из-за отсутствия до настоящего времени сейсмического обнаружения такого события. Тем не менее, то, что реальные данные по радионуклидам и свидетельства моделирования подкрепляются наводящими на размышления заявлениями из Северной Кореи, выглядит как примечательное совпадение⁵⁷. Далее, возможность проведения имитации испытания в Северной Корее, или даже аварии реактора в Северной Корее, может быть почти полностью исключена. В особенности короткий период полураспада Xe-135 требует, чтобы он был создан в реакции деления только за несколько дней до его обнаружения. Но, насколько известно, в мае 2010 года в Северной Корее не было действующего ядерного реактора. Кроме того, имитация испытания предположительно должна предусматривать взрыв стержней отработавшего реакторного топлива обычным взрывчатым веществом. Но в том случае, когда таким стержням разумно понадобится время на охлаждение (скажем, несколько недель) перед транспортировкой, то тогда них останется очень мало Xe-135 и Xe-133, и то же самое будет справедливо для Ba-140 и La-140. Даже если отказаться от охлаждения, то вычисления для реактора показывают, что исключительно маловероятно, что отношение активностей Xe-135 и Xe-133 в выгруженном топливе будет больше 1, не говоря уже о таком высоком (около 4), которое наблюдалось в Коджине.

Де Геер предложил сценарий сейсмически развязанного испытания, в котором взрыв происходит внутри большой полости, которая уменьшает амплитуду сейсмических волн таким образом, чтобы испытание осталось необнаруженным, или же, если оно было обнаружено и дискриминировано от химического взрыва (например, в горных работах), привело бы к заниженной оценке мощности по сейсмической информации. Возможность

сейсмической развязки долгое время фигурировала в обсуждениях возможности верификации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний⁵⁸.

Сейсмическая развязка ядерного взрыва (или декаплинг) была продемонстрирована в США в 1966 году, когда устройство «Стерлинг» мощностью 0,38 кт было взорвано внутри полости радиусом около 17 м на глубине 828 м, которая была создана взрывом «Салмон» в 1964 году⁵⁹. Другими, менее известными, сейсмически развязанными американскими ядерными взрывами были «Мини Джейд» 26 мая 1983 года, «Милл Ярд» 9 октября 1985 года и «Дайамонд Форчун» 30 апреля 1992 года. Подробных сведений об этих событиях мало, но все они были взрывами малой мощности в полусферических полостях радиусом около 11 м⁶⁰. В СССР эксперимент по сейсмической развязке ядерного взрыва был проведен в 1976 году; устройство А-III-2 мощностью 8 – 11,5 кт было взорвано в сфероидальной полости радиусом 33 – 38 м на глубине 987 м, которая была образована взрывом устройства А-III мощностью 64 кт в 1971 году⁶¹. Отношения мощности к объему полости для событий «Стерлинг» и А-III-2 были соответственно примерно равны 20 и 50 кг/м³. Соответствующие коэффициенты декаплинга в экспериментах США и СССР приблизительно равнялись 70 для событий «Стерлинг» и «Милл Ярд», и 15 – 30 для А-III-2, где коэффициент декаплинга (DF) определялся как величина, на которую уменьшалась амплитуда долгопериодической (то есть, низкочастотной) сейсмической волны⁶². Поэтому магнитуда объемной волны уменьшалась в $\log_{10}(DF)$ раз⁶³. Стивенс и др. проанализировали сейсмическую развязку в несферических полостях в граните с помощью химических взрывов, и обнаружили, что как частичные, так и полные (химические) коэффициенты декаплинга (DF) лежат в пределах от 35 до 130 при отношениях мощности взрыва к объему полости ≤ 10 кг/м³.⁶⁴ В области выше около 15 кг/м³ величина DF резко уменьшается до примерно 10, в то время как моделирование показывает, что это падение должно произойти в области 25 – 50 кг/м³. В предположении, что химические взрывы сейсмически связываются вдвое лучше, чем ядерные (как было обнаружено во многих исследованиях), из этих экспериментов будет следовать, что аналогичные ядерные коэффициенты декаплинга (DF) будут соответствовать в два раза большим отношениям мощности к объему полости, в хорошем соответствии с цитированными выше ядерными данными (хотя даже и в соли)⁶⁵. Аналогичные результаты были получены Мерфи и др. в экспериментах с взрывчатыми веществами в известняковых полостях; они обнаружили также, что сейсмическая развязка относительно нечувствительна к форме полости, так что цилиндрические полости с отношением длины к ширине от 6 до 12 дают такие же коэффициенты декаплинга (DF), как и сферические полости эквивалентного объема⁶⁶.

На основании мощностей взрывов в испытаниях 2006 и 2009 годов можно сделать грубую оценку магнитуды сейсмически развязанного испытательного взрыва мощностью 200 тонн на северокорейском испытательном полигоне⁶⁷. Недавний анализ с использованием независимых методологий, а также короткопериодических и долгопериодических данных позволяет предположить, что мощности испытаний равнялись по крайней мере около 1 кт и 5 кт соответственно, в частности, для глубины захоронения в 200 м в 2006 году и в 550 м в 2009 году⁶⁸. В этих оценках мощностей использовался калибровочный химический взрыв известной мощности на северо-востоке Китая между полигоном NKTS и станцией в Муданьцзяне (MDJ) в Китае⁶⁹, вместе с данными по испытаниям 2006 и 2009 года и тщательно испытанной моделью сейсмического источника для одновременного решения для мощности и глубины захоронения, таким образом устраняя плохо ограниченные переменные распространения, и используя инверсию тензора полного момента и модель сейсмического источника, пригодную для Северной Кореи⁷⁰. Для целей данной работы 1 кт и 5 кт были приняты как представительные мощности северокорейских ядерных испытаний 2006 и 2009 года⁷¹. Масштабированная глубина захоронения (SDOB) предполагалась соответственно равной 200 и 320 м/кт^{1/3}.⁷² С этими мощностями и максимально правдоподобной оценкой разности магнитуд объемной волны, равной $4,62 - 3,94 = 0,68$, можно будет построить приближенное соотношение $m_b - Y$ для северокорейского испытательного полигона⁷³. Без учета глубины захоронения и поглощения в верхней мантии это соотношение имеет вид $m_b = 0,973 \times \log_{10} Y + 3,94$. Следовательно, «ожидаемая» магнитуда события с мощностью 0,2 кт будет примерно равна $m_b = 3,26$ ⁷⁴.

Согласно Кверна и др., даже $m_b = 3,26$ для полностью связанного события мощностью 200 тонн не будет обязательно означать автоматического обнаружения на станции IMS плюс в Муданьцзяне в Китае, для которой порог обнаружения равен примерно 3,5⁷⁵. Эта величина определена как оценка при 90-процентном уровне вероятности для наименьшего сейсмического события, которое может быть обнаружено тремя станциями сети, или более, при соотношении сигнала к шуму ≥ 4 . События с меньшими магнитудами могут быть обнаружены, но для этого потребуются специальное программное обеспечение, или, иными словами, аналитик должен знать, где ему смотреть⁷⁶. Кроме того, дискриминация между ядерным и химическим (например, в горных работах) взрывами при малых магнитудах становится все более трудной.

Для сейсмической развязки взрыва Северная Корея могла бы использовать несколько различных методов. Например, в мае 2010 года у Северной Кореи могло бы быть две ранее существующих полости, оставшиеся от двух предыдущих испытаний (если только эти полости не обрушились). Радиусы этих полостей для взрывов

мощностью 1 и 5 кт на глубинах 200 и 550 м должны быть равными 13,5 м и 16,7 м соответственно (при использовании стандартной формулы для радиуса полости, R_c , в зависимости от глубины захоронения h и мощности W в граните, а именно $R_c = 75,1 \cdot W^{1/3} / h^{0,323}$)⁷⁷. Лейт предположил, что радиус полной сейсмической развязки для взрыва мощностью 1 кт на глубине 828 м в граните равен 20 м⁷⁸. На такой же глубине, согласно масштабу кубического корня, радиус для взрыва в 0,2 кт равен 11,5 м. На глубинах в 200 м и 550 м радиусы, опять же согласно масштабу кубического корня, будут равны 18,5 и 13,2 м. Так что если предполагаемый взрыв 2010 года произошел бы в полости 2006 года, то могла бы быть достигнута частичная сейсмическая развязка, если бы он произошел в полости 2009 года, то тогда бы он был полностью сейсмически развязан.

Прецеденты ядерных взрывов в граните, например, 13 французских взрывов в Алжире и 3 взрыва в США, показывают, что полости обрушиваются вскоре после взрыва, вероятно, в течение одного часа⁷⁹. Тем не менее, это может не быть проблемой, как может показаться, поскольку результатом может быть так называемый столб обрушения, приблизительно цилиндрическая область, заполненная упавшими обломками и простирающаяся вверх на несколько радиусов полости. В верхней части располагается пустое пространство, наблюдавшееся во всех трех американских испытаниях в граните, а именно, «Хардхат», «Шоал» и «Пайлдрайвер», общий объем которого, вместе с пустотой между обломками, предположительно равен первоначальному объему полости. Поэтому столбы являются весьма пористой средой, и последующий взрыв, вероятно, будет связываться гораздо менее эффективно, во многом по той же самой причине, которая известна для аллювия на Невадском испытательном полигоне⁸⁰.

Мелкомасштабные эксперименты с взрывчатым веществом показывают, что взрывы в столбе обрушения могут характеризоваться высокими коэффициентами сейсмической развязки⁸¹. Сайкс ссылался на несколько событий (не идентифицированных), в которых ядерный взрыв проводился в столбе обрушения от предыдущего испытания, отметив, что эти взрывы генерировали меньшие, чем нормальные сейсмические волны, уменьшая m_b на величину, такую же, как у среды с «плохим взаимодействием»⁸². Это предположительно относится к сухому, пористому туфу или аллювию, который при пористости около 20 процентов, может привести к m_b на 0,75 – 1 единицу меньше, чем для материала с «хорошим взаимодействием»⁸³. Такой сценарий может привести к уменьшению магнитуды волны от взрыва мощностью 200 тонн в Северной Корее от 3,26 до 2,26 – 2,51, или кажущейся мощности в 19 – 34 тонны, используя приблизительное соотношение m_b - Y .

Северная Корея могла также использовать глубокую природную пещеру в окрестностях полигона NKTS для проведения сейсмически развязанного испытания, или могла специально вырыть такую полость, которая не обязательно должна быть сферической. Лейт отмечает, что конструктивная устойчивость большинства подземных вскрытий базируется на относительной прочности наименьшего размера открытого отверстия, и что экскавация таких структур – с наибольшим неподдерживаемым пролетом примерно в 20 м – это широко доступная и обычно применяемая технология⁸⁴. Вероятно, что такая схема применялась в Северной Корее, и ее сигнатуры мало отличаются от операций в обычных горных работах и прокладке туннелей. При стандартной глубине в 400 м радиус полной сейсмической развязки для сферической полости в граните примерно равен 15 м. Это является также наименьшим размером несферической полости для полной сейсмической развязки. Поскольку было показано, что соотношение геометрических размеров 4:1:1 обеспечивает эквивалентную сейсмическую развязку, то размеры 60:15:15 м будут достаточными, поскольку они предоставляют объем, эквивалентный сферическому варианту.

Даже если будет обеспечена только частичная сейсмическая развязка, то коэффициент декаплинга DF будет равен 30, а ожидаемая магнитуда будет равна примерно 3,26 – $\log_{10}(30) = 1,78$. Кажущаяся мощность будет равна 6 тоннам, в соответствии с приблизительным соотношением m_b - Y . При полной сейсмической развязке с коэффициентом DF , равным 70, ожидаемая магнитуда составит только около 3,26 – $\log_{10}(70) = 1,41$, что соответствует мощности примерно в 2,5 тонны. Возможные магнитуды и предполагаемая мощность соответствуют измеренным магнитудам и известным мощностям химических взрывов, проведенным в северо-восточном Китае вблизи границы между Северной Кореей и Китаем, и на расстоянии менее 200 км от северокорейского испытательного полигона⁸⁵. Мощность одного из них равнялась 1,45 тонны, глубина захоронения составляла 28,8 метра, и зарегистрированная магнитуда равнялась $m_b = 1,66$ (измерена по L_g -волнам). Используя установленный коэффициент преобразования, равный 2, между химическим и ядерным взрывами, мощность и масштабируемая глубина захоронения $SDOB$ будут равны 2,90 тонны и 202 м/кт^{1/3}, (эта величина аналогична предполагаемой $SDOB$ для ядерного испытания 2006 года)⁸⁶. Приблизительное соотношение m_b - Y для северокорейского испытательного полигона приведет к мощности 4,5 тонны, меньше, чем в два раза, отличающегося от действительной мощности (хотя и скорректированной).

Как показывают наблюдения китайских химических взрывов, в этой части света могут быть зарегистрированы такие низкие магнитуды, как примерно 1,7, хотя, предположительно, надо будет знать, где и в какое время

следует искать⁸⁷. Однако, для самого полигона NKTS, или его окрестностей, минимально обнаружимая магнитуда m_b может быть несколько выше из-за того, что дополнительные 200 км пути до северной станции в Муданьцзяне могут привести к дополнительному ослаблению сигнала. Чун и др. обнаружили, что в этой области Lg-волны сильно поглощаются, возможно из-за относительно высокой температуры коры, и отметили ее сходство с несколькими тектонически активными областями, в том числе со сбросовым хребтом Basin and Range Province, на котором расположен Невадский испытательный полигон⁸⁸. Они предположили, что ранее измеренную величину $m_b(Lg)$ для испытания 2006 года необходимо скорректировать в верхнюю сторону примерно на 0,35 единицы. Кроме того, большинство путей до южнокорейских станций пересекают границы материка Японского моря, где более тонкая кора также сильно поглощает Lg-волны. Это может привести к различию до 1 единицы магнитуды между чисто континентальными путями и путями, пересекающими границу⁸⁹.

Многие последние независимые исследования показали, что Северная Корея и окружающие ее области обладают геофизическими свойствами, показывающими, что там сильно поглощаются не только Lg-волны, но и несколько других типов сейсмических волн. К таким свойствам относятся скорость в крышке мантии⁹⁰ ≤ 8 км/с, низкие скорости S- и P-волн⁹¹ до глубины в несколько сотен километров, поток тепла⁹² ≥ 60 мВт/м² и неэффективное распространение Sn-волн⁹³. Общепринятая точка зрения на поглощение в верхней мантии, представленное параметром Q, состоит в том, что оно обусловлено повышенными температурами мантии (T) на глубинах 200 – 400 км, которые в свою очередь приводят к меньшим сейсмическим скоростям (V)⁹⁴. Хотя соотношение между T, V, и Q не всегда точно, Артемьева и др. обнаружили, что в китайско-корейском щите они коррелируют, и назвали эту область «неожиданно горячей»⁹⁵.

Возможно, некоторой поддержкой этой цепочки рассуждений служит то, что Кверна и др. обнаружили, что характерная для площадки пороговая способность мониторинга станций Международной системы мониторинга (IMS), лежащая в пределах от 2,3 до 2,5, может быть улучшена до 2,1 – 2,3, и, возможно, даже до 2,0, при добавлении станции в Муданьцзяне (MDJ)⁹⁶. Эта величина определяется как оценка на уровне 90-процентной вероятности наибольшего гипотетического сейсмического события на данной площадке или в данном регионе, которое, возможно, могло произойти. Другими словами, это является верхним пределом магнитуды не обнаруженных событий, и это превышает магнитуды химических взрывов в северо-восточном Китае. Шафф и др. определяют несколько меньший порог для самого полигона NKTS в примерно 1,4 – 1,7 в период с 10 по 11 мая 2010 года, используя в качестве эталона сейсмические сигналы 2006 и 2009 года на станции в Муданьцзяне⁹⁷. Как отмечалось выше, это может соответствовать мощности полностью связанного взрыва примерно в 2,5 – 5 тонны (хотя Шафф и др. используют другое соотношение m_b -Y, из которого следует мощность в 0,16 – 0,40 тонны, то есть 160 – 400 кг, что на основании данной работы представляется нереалистично низким)⁹⁸. Для северо-восточной области Северной Кореи Шафф и др. вместо этого предлагают нижний предел локальной магнитуды $M_L \leq 2,0$. С $M_L = 3,6$ для испытания 2006 года это предполагает нижний предел для мощности полностью связанного взрыва в 6,5 – 13 тонны, при мощности взрыва 2006 года в 0,5 – 1,0 кт и наклоне соотношения магнитуды и мощности в 0,85⁹⁹.

Следовательно, отсутствие сейсмического обнаружения не обязательно исключает возможность испытательного ядерного взрыва мощностью 200 тонн, проведенного Северной Кореей 11 мая 2010 года. Это полностью согласуется с тем, что известно о физике и прошлой практике сейсмической развязки, геофизике полигона NKTS, и его порогах обнаружения и мониторинга. Если предполагаемая мощность взрыва будет меньше 200 тонн, скажем, 100 тонн, или даже 50 тонн, то тогда ситуация для сейсмического обнаружения станет еще труднее, хотя она все еще будет согласоваться с данными по радионуклидам, единственно требуя увеличения доли выброса в 2 – 4 раза, которая все еще будет меньше одного процента¹⁰⁰.

СЕЙСМИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННОЕ, НО НЕ КАМУФЛЕТНОЕ ИСПЫТАНИЕ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ?

Сейсмическая развязка ядерного испытания еще не означает, что испытательный взрыв не будет камуфлетным в отношении к выбросу радионуклидов. При испытании 2006 года в Северной Корее произошел выброс, который был обнаружен в Южной Корее, Канаде и над Японским морем¹⁰¹. В более общем смысле, как отмечал Лейт, имеются качественные основания для того, чтобы считать, что выброс инертных газов более вероятен при взрыве в сейсмически развязанной полости, чем при взрыве в полностью связанной полости¹⁰². Удержание будет в большей степени зависеть от существующих до взрыва напряжений в скальном грунте и связанных с ними трещин, разрывов, расщелин и геологических разломов. Они предоставляют газу естественный выход для миграции к поверхности. Такие разломы в скальном грунте могут создаваться и (или) расширяться при взрывном создании полости, как, например, в одиночном ядерном взрыве, или взрыве обычного взрывчатого вещества. Лейт отмечал, что нарушитель может провести предварительные испытания с химическими взры-

вами внутри вновь созданной полости для исследования миграции горячих газов, хотя экстраполяция к ядерному взрыву большей мощности все еще будет чревата неопределенностями.

Свидетельства подобного поведения в экспериментах с взрывчатыми веществами и в американской программе ядерных испытаний были представлены Смитом¹⁰³. Он отметил, что частично сейсмически связанные ядерные взрывы характеризуются различными свойствами удержания, отмечая взрыв «Ред Хот» 5 марта 1966 года, испытание в туннеле в туфовом массиве Rainier Mesa, в котором произошел выброс инертных газов криптона и ксенона, а также нескольких изотопов йода¹⁰⁴. С другой стороны, согласно Смигу, полностью связанные и полностью сейсмически развязанные события проявляют несколько лучшее удержание. Хотя данные по частично и полностью сейсмически развязанным испытаниям предположительно статистически ограничены, исторические ядерные данные наводят на размышления, и по-видимому поддерживают результаты экспериментов с взрывчатыми веществами в статье Смита. В программе «Джуниор Джейд» последовательность из пяти экспериментов с взрывчатыми веществами с постепенно увеличивающейся сейсмической развязкой показывали возрастающие потери давления в полости сразу же после взрыва. Это в свою очередь указывало на постепенное увеличение потери удержания, согласующееся с наблюдаемым количеством и протяженностью образующихся при взрыве разломов, через которые мог выходить газ.

Как уже отмечалось, историческая программа ядерных испытаний в США включает некоторые близкие аналоги предполагаемому испытанию в Северной Корее, а именно, взрывы малой мощности, проведенные в подземных полостях, достаточных для по крайней мере частичной сейсмической развязки. К ним относятся «Ред Хот» 5 марта 1966 года, «Мини Джейд» 26 мая 1983 года, «Милл Ярд» 9 октября 1985 года и «Дайамонд Форчун» 30 апреля 1992 года. Еще более близким аналогом является испытание «Тайни Тот» – взрыв малой мощности (менее 500 тонн) в туннеле, проведенное 17 июня 1965 года в полусферической полости в граните радиусом 10 метров на глубине около 110 м¹⁰⁵. Согласно Мерритту, устройство «Тайни Тот» располагалось в центре плоского гранитного пола; испытание было предназначено для получения непосредственной информации о подземной ударной волне и образовании кратера при взрыве над поверхностью скальной породы¹⁰⁶. Размер полости в испытании «Тайни Тот» был выбран таким образом, чтобы уменьшить давление на стены до области упругости скальной породы, что фактически является определением полной сейсмической развязки. Мерритт также отмечал, что забойка взрывов в полостях более сложна, чем плотная забойка взрывов. Для взрыва «Тайни Тот» забойка осуществлялась системой заглушек внутри входного туннеля, спроектированной так, чтобы противостоять силам в полости и таким образом удерживать радиоактивности внутри полости. При испытании радиоактивность почти мгновенно появилась между первой и второй заглушками, и высокие уровни радиации появились в течение 10 минут. Через несколько часов активность проникла через вторую заглушку, а потом и через песочную заглушку. Неконтролируемый выброс, преимущественно инертных газов, в частности, ксенона, достиг входа в шахту «Тайни Тот» примерно через 15 минут после взрыва и продолжался в течение примерно 15 часов. Была достигнута определенная сейсмическая развязка, несмотря на то, что устройство находилось не в центре полости, а в контакте с плоским гранитным полом. Действительный коэффициент декаплинга опубликован не был. Однако, Мерритт отметил, что две сейсмические станции на расстоянии в 150 и 170 км не зарегистрировали сигнал над уровнем шума, хотя они и обнаружили близко располагавшийся взрыв «Хард Хэт» мощностью 5,7 кт 15 февраля 1962 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен подробный анализ обнаружений радионуклидов на Корейском полуострове и вблизи него в мае 2010 года, о которых сообщалось Де Геером¹⁰⁷. Это включало моделирование прямого и обратного атмосферного переноса для получения возможных траекторий, и концентраций в факеле, так же, как и расчеты активности ксенона, произведенного как в реакторе, так и взрыве. Результаты этого исследования таковы:

1. Несмотря на наличие примерно 100 гражданских установок ядерного топливного цикла на Корейском полуострове, и рядом с ним, обнаружения пылевых частиц с дочерними ядрами от распада ксенона на Окинаве и самого ксенона в Коджине локально и регионально уникальны среди соответствующих исторических данных. Обнаружения на Окинаве также глобально уникальны с момента добровольного моратория на ядерные испытания в последние 15 – 20 лет. Относительно высокое отношение Xe-135/Xe-133 в Коджине также указывает на весьма необычное в глобальном смысле событие.
2. В согласии с Де Геером и Вотавой¹⁰⁸ было обнаружено, что Северная Корея является самым лучшим кандидатом для происхождения обнаружений на Окинаве и в Коджине. То, что различные программы моделирования атмосферного переноса и наборы метеорологических данных приводят к согласующимся результатам, придает уверенность в их надежности. Внутри Северной Кореи модели предпочитают район вокруг

известного полигона ядерных испытаний району вокруг комплекса производства расщепляющихся материалов в Йонбене, что также согласуется с результатами Вотавы. Ни один другой ядерный энергетический, исследовательский, или судовой реактор в Республике Корея, Японии, континентальном Китае, России, или на Тайване, не обеспечивает такого же хорошего соответствия с временными характеристиками обнаружений. Только полигон NKTS может представлять правдоподобный источник обнаружений как на Окинаве, так и в Коджине, хотя для этого требуются два отдельных выброса ксенона с промежутком примерно в 36 часов.

3. Ни отношение Ba-140/Cs-137, ни отношение Xe-135/Xe-133, не согласуются с ядерным реактором, работающим в равновесном состоянии. Отношение Xe-135/Xe-133 также превышает опубликованные значения для образцов, измеренных в хранилищах газообразных отходов на установках для производства медицинских изотопов. Оба отношения могут быть согласованы с ядерным реактором в процессе запуска, но для этого потребуются сложная последовательность выбросов. Кроме того, если Xe-137 и Xe-140 регулярно выбрасываются из реакторов в процессе их запуска, то их дочерние продукты, в частности Ba-140 и La-140, должны будут гораздо чаще обнаруживаться во всем мире, что противоречит действительному опыту. Далее, авария на реакторе кажется маловероятной, поскольку в таком случае почти определенно будут обнаружены другие пылевые частицы, и сообщения о таких событиях почти определенно в конце концов появятся в средствах массовой информации.
4. Обнаруженные концентрации радионуклидов согласуются с возможными параметрами источника ядерного взрыва малой мощности, то есть до нескольких сотен тонн, проведенного в 0600 UTC 11 мая 2010 года, времени, определенного Де Геером. В зависимости от точного механизма выброса, требующаяся доля выброса инертных газов для обоих выбросов будет равна только нескольким десятым долям процента. Обнаруженные отношения активности также согласуются с ядерным взрывом. Анализ не позволяет ясно отличить U-235 от Pu-239 в качестве расщепляющегося материала в испытании.
5. Отсутствие сейсмического обнаружения не обязательно является удивительным, учитывая, что расположение полигона NKTS характеризуется относительно сильным поглощением региональных волн, как в северном, так и в южном направлении, хотя и по разным причинам. Испытание мощностью 200 тонн, сейсмически развязанное с коэффициентом ≥ 30 , приведет к магнитуде объемной волны $\leq 1,8$, меньшей, чем опубликованный порог мониторинга полигона NKTS с использованием самых чувствительных станций. Такая сейсмическая развязка была продемонстрирована для многих ядерных и химических взрывов в различных средах и для различных конфигураций полости. То, что при испытании были выброшены инертные газы, также же вызывает удивления в контексте исторической базы данных ядерных испытаний.

Данные, моделирование и анализ указывают на проведение необъявленного ядерного испытания Северной Кореей 11 мая 2010 года. Сейсмически развязанный, но сопровождающийся радиологическим выбросом ядерный взрыв предоставляет простейшее объяснение. Не было обнаружено ничего, что могло бы исключить, или сделать маловероятным такой сценарий, и не было найдено никакого другого правдоподобного местоположения и не было идентифицировано никакого физического процесса, которые могли бы объяснить данные в их целостности. То, что обнаружения радионуклидов сопровождалось интригующими заявлениями из Северной Кореи, сделанными как до, так и после события, позволяют предположить, что в соответствующий временной период произошло нечто существенное и имеющее ядерную природу.

Если предложенный здесь и Де Геером сценарий имеет некоторое отношение к тому, что произошло в действительности, то тогда он является недвусмысленной демонстрацией эффективности Международной системы мониторинга Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, и того, что вероятность обнаружения велика даже в случае сейсмически развязанного испытания. Это предоставит паузу для размышлений любому будущему нарушителю, рассматривающему тайное ядерное испытание. С другой стороны, если ядерное испытание не имеет отношения к данному событию, то тогда понадобится улучшить текущее понимание механизмов выброса инертных газов и пылевых частиц из невзрывных ядерных источников, чтобы избежать любых «ложных тревог» в будущем.

ВОЗМОЖНАЯ БУДУЩАЯ РАБОТА

Здесь представлены предложения для будущей работы, которые могут пролить дополнительный свет на этот вопрос.

1. Модельный факел пылевых частиц проходит над широкой полосой в южной Японии в течение 3 дней до того, как он достигнет Окинавы с предсказанными концентрациями Ba-140 по крайней мере в несколько

- сотен микробеккерелей на кубический метр, и, может быть даже выше 1000 мкБк/м³. Следует провести поиск любых таких обнаружений, или обнаружений долгоживущего Cs-137, в юго-западной Японии, возможно, на реакторных комплексах, или на других установках, относящихся к ядерным.
2. До сих пор в фильтрах пылевых частиц на Окинаве обнаруживались только гамма-излучающие изотопы. Следует также, если это возможно, поискать бета-излучатели, такие, как Sr-90 с периодом полураспада около 29 лет. Его предшественник, Kr-90, имеет период полураспада около 32 секунд и прямой выход в делении, аналогичный Xe-140. Его отношение активности с Cs-137 может предоставить дополнительное ограничение на происхождение.
 3. Как предлагал Перссон, возможно, что автордиография фильтров с Окинавы может позволить отличить частицы с радиоактивностью, возникшей от газовых предшественников – дающих равномерное почернение – от тех, в которых Ba/La-140, Cs-137 и Sr-90 были непосредственно выброшены. Последние могли возникнуть в аварии реактора, ведущей к дискретным, так называемым «горячим частицам», возможно, напоминающим выпадающие частицы от ядерных взрывов в атмосфере.
 4. Поскольку модели дисперсии HYSPLIT не воспроизводят все особенности наблюдаемого на Окинаве факела, в особенности, двух пиков концентрации, разнесенных на несколько дней, требуется более уточненное моделирование для изучения более широкого пространства параметров. Может потребоваться лучшее разрешение, использующее более подробные локальные погодные условия вокруг Окинавы, и (или) оптимизированные свойства частиц с выпадением, включающем приостановку.
 5. Потребуется статистика для временного поведения обнаружения ксенона, и, следовательно, фона ксенона на Уссурийской станции RUX58 CTBT IMS, и, в частности, любых повышенных уровней, которые могли быть обнаружены во время предполагаемого ядерного взрыва. Кроме того, более подробная статистика со станций CNX20 в Пекине и MNX45 в Улан-Баторе могла бы оказаться полезной для лучшего ограничения типичного ксенонового фона в регионе.

В предположении выброса из реактора, следует определить возможность обнаружения спектров других изотопов с предшественниками из инертных газов, включая предшественников из криптона, на Окинаве. Изотопы инертных газов с периодами полураспада короче примерно 10 секунд могут быть особенно полезными для диагностики, поскольку они не могут покинуть полость взрыва до их распада; это ограничение не относится к сценарию выброса из реактора. Возможными изотопами могут быть Ce-141, Sr-89, Sr91, Y-91, и Y-93. В отношении к этому следует провести более реалистичное моделирование запасов инертных газов в течение процесса запуска ядерного реактора продолжительностью в несколько дней для того, чтобы определить, согласуются ли предсказанные изотопные отношения с теми, которые определяются из данных измерений.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Lars-Erik De Geer, "Radionuclide Evidence for Low-yield Nuclear Testing in North Korea in April/May 2010," *Science & Global Security*, 20 (2012): 1, 1–29.
2. Web-Grape – это программное обеспечение, разработанное Международным центром данных Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Оно используется как средство визуализации для идентификации возможных точек эмиссии обнаруженного радионуклидного события на глобусе на основании формы сигнала и данных по радионуклидам. Программное обеспечение построено на результатах моделирования атмосферной дисперсии и переноса, которое рассчитывает путь перемещения заданного факела радионуклидов с использованием метеорологических данных.
3. Gerhard Wotawa, "Meteorological Analysis of the Detection of Xenon and Barium/Lanthanum Isotopes in May 2010 in Eastern Asia," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, DOI 10.1007/s10967–012-2012–7, published online: 03 August 2012.
4. Цепочка с массовым числом 140 сначала проходит через промежуточный изотоп Cs-140 с периодом полураспада 63,7 секунды.
5. R. R. Draxler and G.D. Hess, 1997, "Description of the HYSPLIT-4 Modeling System," NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224.
6. Andreas Becker, Gerhard Wotawa, Lars-Erik De Geer, Petra Seibert, Roland R. Draxler, Craig Sloan, Real D'Amours, Matthew Hort, Hubert Glaab, Philippe Heinrich, Yves Grillon, Vyacheslav Shershakov, Keiichi Katayama, Yuetang Zhang, Paul Stewart, Marcus Hirtl, Michel Jean, and Peter Chen, "Global Backtracking of Anthropogenic Radionuclides by Means of a Receptor Oriented Ensemble Dispersion Modeling System in Support of Nuclear-Test-Ban Treaty Verification," *Atmospheric Environment*, 41(2007): 4520–4534.

7. Andreas Stohl, "Computation, Accuracy and Applications of Trajectories—a Review and Bibliography," *Atmospheric Environment*, 32 (1998): 6, 947–966; Andreas Stohl, Sabine Eckhardt, Caroline Forster, Paul James, Nicole Spichtinger, and Petra Seibert, "A Replacement for Simple Back Trajectory Calculations in the Interpretation of Atmospheric Trace Substance Measurements," *Atmospheric Environment*, 36(2002): 4635–4648; Zoe L. Fleming, Paul S. Monks, and Alistair J. Manning, "Review: Untangling the Influence of Air-mass History in Interpreting Observed Atmospheric Composition," *Atmospheric Research* 104–105(2012): 1–39.
8. Glenn D. Rolph and Roland R. Draxler, "Sensitivity of Three-dimensional Trajectories to the Spatial and Temporal Densities of the Wind Field," *Journal of Applied Meteorology*, 29(1990): 1043–1054.
9. Robert Kistler, Eugenia Kalnay, William Collins, Suranjana Saha, Glenn White, John Woollen, Muthuvel Chelliah, Wesley Ebisuzaki, Masao Kanamitsu, Vernon Kousky, Huug van denDool, Roy Jenne, and Michael Fiorino, "The NCEP–NCAR 50Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation," *Bulletin of the American Meteorological Society* 82 (2001): 2, 247–267.
10. Gerhard Wotawa (2012), *op. cit.* (ссылка 3)
11. D. V. Ionov and A. V. Poberovskii, "Nitrogen Dioxide in the Air Basin of St. Petersburg: Remote Measurements and Numerical Simulation," *Atmospheric and Oceanic Physics*, 4 (2012): 4, 373–383; A. Tessorodorf, Courtney E. Weeks, Roelof T. Bruintjes, Duncan Axisa, "Cloud base aerosol characteristics and implication for microphysics in southeast Queensland," *Proceedings of the 91st American Meteorological Society meeting, 2011*.
12. Kristi A. Gebhart, Bret A. Schichtel, and Michael G. Barna, "Directional Biases in Back Trajectories Caused by Model and Input Data," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55 (2005): 1649–1662.
13. Roland R. Draxler, "Demonstration of a Global Modeling Methodology to Determine the Relative Importance of Local and Long-distance Sources," *Atmospheric Environment*, 41(2007): 776–789.
14. "North Korea's Weapons Programmes: A Net Assessment," *International Institute for Strategic Studies, Strategic Dossier*, 2004.
15. Lianxing Wen and Hui Long, "High-precision Location of North Korea's 2009 Nuclear Test," *Seismological Research Letters*, 81 (2010): 1, 26–29; Neil D. Selby, "Relative Locations of the October 2006 and May 2009 DPRK Announced Nuclear Tests Using International Monitoring System Seismometer Arrays," *Bulletin of the Seismological Society of America* 100 (2010): 4, 1779–1784.
16. Наиболее заметно то, что прямые траектории – от начальных высот, простирающихся до 2 500 м и горизонтальных смещений в $\pm 0,1$ градуса по долготе и широте – всегда начинаются в одинаковых направлениях. Например, траектории, идущие от полигона NKTS до Окинавы, начинающиеся во время события деления Де Геера, всегда первоначально направляются на юго-восток и затем пересекают Японское море. Но при подходе к Японии, или во время ее пересечения, или после него, траектории GDAS становятся более чувствительными к различным стартовым положениям, будь то горизонтальным или вертикальным. Они сильнее расходятся, включая перемещение в противоположных направлениях, когда траектории, достигающие больших высот, «захватываются» струйным течением северного Тихого океана, направленным с запада на восток. Кроме того, прямые траектории от полигона NKTS до Коджина всегда начинаются в направлении, близком к южному, для обеих наборов данных. Для всех траекторий с набором данных для повторного анализа путь продолжается на юг, приводя их близко к Коджину перед разворотом и движением на север. Для траекторий с набором данных GDAS поворот на север происходит сразу же после пересечения побережья Северной Кореи, кроме траекторий с начальными высотами более примерно 1 400 м. Для последних поведение аналогично траекториям с данными для повторного анализа. Обратные траектории с Окинавы для наборов данных для повторного анализа и GDAS очень похожи. Траектории GDAS, рассчитанные в области до $\pm 0,25$ градусов по широте и долготе от станции мониторинга на Окинаве, проходят близко от полигона NKTS. Траектории с данными для повторного анализа с пространственными смещениями $\pm 0,5$ градуса, проходят по самой северной части Северной Кореи, вблизи границ с Россией и Китаем. Это согласуется с ожидаемой точностью одиночных траекторий, в особенности для такого длительного временного и протяженного пространственного пути. В обратных траекториях от Коджина проявляются значительно большие вариации и между двумя наборами данных, и для данных GDAS между пространственными смещениями в $\pm 0,25$ градуса. Данные для повторного анализа производят траектории, которые подходят близко к полигону NKTS, и смещения в $\pm 0,5$ градуса приводят только к небольшим вариациям. Для данных GDAS большинство траекторий все еще проходит над Северной Кореей, но они находятся над морем примерно в 100 км к востоку-юго-востоку от Коджина в предполагаемое время задержки выброса.
17. M. Zahringer, J. Bieringer, and C. Schlosser, "Three Years of Operational Experience From Schauinsland CTBT Monitoring Station," *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(2008): 596–606; M. Matthews et al., 2010, Workshop on Signatures of Medical and Industrial Isotope Production – A Review, PNNL-19294, US Department of

- Energy. Отметим, что обнаружение La-140 на станциях IMS в Германии не сопровождалось соответствующим обнаружением Ba-140, что привело к предположению, что La-140 появился в результате учений по деактивации на открытом воздухе. Однако, поскольку оба изотопа были действительно обнаружены в Уссурийске, сценарий «учений по деактивации» выглядит весьма маловероятным.
18. Gerhard Wotawa (2012), *op. cit.* (ссылка 3)
 19. Yasuhito Igarashi, Takashi Miyao, Michio Aoyama, Katsumi Hirose, Hartmut Sartorius, and Wolfgang Weiss, "Radioactive Noble Gases in Surface Air Monitored at MRI, Tsukuba, Before and After the JCO Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, 50(2000): 107–118, Table 2 and Figure 2.
 20. Yasuhito Igarashi, Hartmut Sartorius, Takashi Miyao, Wolfgang Weiss, Katsuhiko Fushimi, Michio Aoyama, Katsumi Hirose, and Hisayuki Y. Inoue, "85Kr and 133Xe Monitoring at MRI, Tsukuba and its Importance," *Journal of Environmental Radioactivity*, 48(2000): 191–202.
 21. A. Ringbom, H. Henriksson, M. Auer, I. Hoffman, G. Le Petit, P. Saey, C. Schlosser, and G. Wotawa, 2009b, "Characterization of the Global Distribution of Atmospheric Radioxenon," Poster RN-19D at the International Scientific Studies Conference, Vienna, 10-12 June 2009, <http://www.ctbto.org/specials/the-international-scientific-studies-project-iss/scientific-contributions/radionuclideposters/>
 22. Martin B. Kalinowski and Christoph Pistner, "Isotopic Signature of Atmospheric Xenon Released from Light Water Reactors," *Journal of Environmental Radioactivity*, 88(2006): 215–235; Martin B. Kalinowski and Matthias P. Tuma, "Global Radioxenon Emission Inventory Based on Nuclear Power Reactor Reports," *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(2009): 1, 58–70; Martin B. Kalinowski, Anders Axelsson, Marc Bean, Xavier Blanchard, Theodore W. Bowyer, Guy Brachet, Simon Hebel, Justin I. McIntyre, Jana Peters, Christoph Pistner, Maria Raith, Anders Ringbom, Paul R.J. Saey, Clemens Schlosser, Trevor J. Stocki, Thomas Taffary, and R. Kurt Ungar, "Discrimination of Nuclear Explosions against Civilian Sources Based on Atmospheric Xenon Isotopic Activity Ratios," *Pure & Applied Geophysics*, 167 (2010): 517–539.
 23. Ringbom et al. (2009b), *op. cit.* (ссылка 21)
 24. Kalinowski and Pistner (2006), *op. cit.* (ссылка 22); Kalinowski and Tuma (2009), *op. cit.* (ссылка 22); Kalinowski et al. (2010), *op. cit.* (ссылка 22); Martin B. 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; Paul R. J. Saey, "The Influence of Radiopharmaceutical Isotope Production on the Global Radioxenon Background," *Journal of Environmental Radioactivity*, 100(2009): 396–406; Paul R. J. Saey, Theodore W. Bowyer, and Anders Ringbom, "Isotopic Noble Gas Signatures Released from Medical Isotope Production Facilities—Simulations and Measurements," *Applied Radiation and Isotopes*, 68(2010a): 1846–1854; Paul R. J. Saey, Matthias Auer, Andreas Becker, Emmy Hoffmann, Mika Nikkinen, Anders Ringbom, Rick Tinker, Clemens Schlosser, and Michel Sonck, "The Influence on the Radioxenon Background during the Temporary Suspension of Operations of Three Major Medical Isotope Production Facilities in the Northern Hemisphere and during the Start-up of Another Facility in the Southern Hemisphere," *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(2010b): 730–738; S. R. Biegalski, T. Saller, J. Helfand, and K. M. F. Biegalski, "Sensitivity Study on Modeling Radioxenon Signals from Radiopharmaceutical Production Facilities," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 284(2010): 663–668.
 25. Данные со станций СТБТ IMS из Ringbom et al. (2009b), *op. cit.* (ссылка 21); данные по Кансонгу из Anders Ringbom, Klas Elmgren, Karin Lindh, Jenny Peterson, Theodore W. Bowyer, James C. Hayes, Justin I. McIntyre, Mark Panisko, and Richard 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(2009a): 773–779; Geojin data from De Geer (2012), *op. cit.* (ссылка 1)
 26. Данные из Коджина располагаются на краю, или даже вне основных, плотно сгруппированных групп на графиках отношение-отношение на рисунке 12 в Kalinowski et al. (2010) (ссылка 22).
 27. Saey (2009), *op. cit.* (ссылка 24)
 28. Biegalski et al. (2010), *op. cit.* (ссылка 24); Saey (2009), *op. cit.* (ссылка 22); Saey et al. (2010a), *op. cit.* (ссылка 24); Saey et al. (2010b), *op. cit.* (ссылка 24)
 29. Rick Tinker, Blake Orr, Marcus Grzechnik, Emmy Hoffmann, Paul Saey, and Stephen Solomon, "Evaluation of Radioxenon Releases in Australia Using Atmospheric Dispersion Modeling Tools," *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(2010): 353–361.
 30. Saey et al. (2010a), *op. cit.* (ссылка 24); Saey et al. (2010b), *op. cit.* (ссылка 24)
 31. Kalinowski and Pistner (2006), *op. cit.* (ссылка 22) Впоследствии Калиновски и Пистнер нашли, что максимальное достигаемое отношение равно 5 – 6 во время второго и третьего циклов реактора, предположительно, когда одна треть активной зоны была перезагружена свежим топливом.
 32. Kalinowski and Pistner (2006), *op. cit.* (ссылка 22) Данные INGE, представленные Калиновски и др. (2010, *op.*

- cit.* (ссылка 22)) включают отношения Xe-135/Xe-133 вплоть до почти 100 (смотрите их рисунки 6 и 12). Поскольку они предположительно получены на станциях мониторинга, удаленных от ядерной установки, отсюда следует, что собственные (то есть, выброшенные) отношения будут еще выше. Они могут представлять выбросы из реактора в самые первые часы после запуска, для которых следует ожидать отношения в несколько сотен (смотрите раздел «Расчеты активностей и изотопных отношений ксенона»). К сожалению, для этих обнаружений не представлено никакого контекста, так что их абсолютные уровни активности или специфическое происхождение неизвестны. Тем не менее, Калиновски и др. отмечают, что они проводили измерения где-то в Северной Америке или в Европе, и поэтому они не могли быть получены на любой азиатской станции INGE, близкой к Корейскому полуострову. Кроме того, их соответствующие отношения Xe-135m/Xe-133 всегда больше 2, в отличие от обнаружений на Коджине. Кажется невероятным, что эти аномально высокие отношения Xe-135/Xe-133 будут иметь отношение к данному исследованию.
33. Chang-Kyu Kim, Jong-In Byun, Jeong-Suk Chae, Hee-Yeoul Choi, Seok-Won Choi, Dae-Ji Kim, Yong-Jae Kim, Dong-Myung Lee, Won-Jong Park, Seong A. Yim, and JuYong Yun, "Radiological Impact in Korea following the Fukushima Nuclear Accident," *Journal of Environmental Radioactivity*, 111(2012): 70–82.
 34. "Monju Restarted for the First Time in 14 Years," <http://www.cnrc.jp/english/newsletter/nit136/nit136articles/monju.html> [last accessed 19/10/2012 7:31:56 PM] "Monju Restart Sets alarms Bells Ringing," <http://www.cnrc.jp/english/newsletter/nit137/nit137articles/monju.html> [last accessed 19/10/2012 7:31:26 PM]; "Another False Alarm at Monju Reactor," <http://www.japantimes.co.jp/text/nn20100521b3.html> [last accessed 22/05/2012 5:55:50 PM]; "Faulty Alarm Hits Monju Reactor One Day after Reactivation," <http://www.istockanalyst.com/article/view/StockNews/articleid/4099275> [last accessed 22/05/2012 6:05:01 PM]; "Monju's Restart Hit by Faulty Gas Detector," <http://www.japantimes.co.jp/text/nn20100508a3.html> [last accessed 17/10/12 5:30 PM].
 35. Хотя Китайский экспериментальный реактор на быстрых нейтронах в Пекине, согласно сообщениям, достиг критичности 21 июля 2010 года, и, по слухам, в конце 2011 года на нем произошла утечка радиации, эти события произошли намного позже обнаружений на Окинаве и в Коджине и они не рассматриваются в качестве возможного варианта ["Chinese Fast Reactor Starts Supplying Electricity," http://www.world-nuclear-news.org/NNChinese_fast_reactor_starts_supplying_electricity-2107114.html; "China Denies Nuclear Accident," http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/asia/china/9044537/Chinadenies-nuclear-accident.html#disqus_thread]. То же самое относится к энергетическим реакторам Дайа Бэй, на одном из которых, как сообщают, 23 мая 2010 года произошла утечка радиации из-за неисправного топливного стержня ["CLP's Lancaster Says Daya Bay Nuclear Plant Leak Was 'Very, Very Minor'," <http://www.bloomberg.com/news/2010-06-15/china-s-daya-bay-nuclear-plantnear-hong-kong-had-very-small-leak-in-may.html>, last accessed 23/05/2012 9:15:19 PM; "Hong Kong: Minor Radiation Leakage at Daya Bay Contained," <http://www.nuclearcounterfeit.com/?p=3065>, last accessed 23/05/2012 9:19:32 PM]
 36. "China Advanced Research Reactor Completed," <http://english.people.com.cn/90001/90776/90881/6989314.html> [last accessed 23/05/2012 6:02:30 PM]; "Chinese Research Reactor Starts up," http://www.world-nuclear-news.org/NN-Chinese_research_reactor_starts_up-1805107.html [last accessed 23/05/2012 6:01:40 PM].
 37. "Chinese Nuclear Accident Alleged," <http://www.offiziere.ch/?p=6511>, last accessed 17/10/12 6:00 pm.
 38. Подробности в отношении этого заявления можно найти в статье De Geer (2012), *op. cit.* (ссылка 1)
 39. M. Benedict, T. H. Pigford, H. W. Levi, *Nuclear Chemical Engineering, 2nd edition*, (McGraw-Hill, Inc., New York: 1981) 63–68; William Rubinson, "The Equations of Radioactive Transformation in a Neutron Flux," *Journal of Chemical Physics*, 17(1949): 6, 542–547.
 40. A. L. Nichols, 2002, "Nuclear Data Requirements for Decay Heat Calculations," Lectures given at the Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety, Trieste, 25 February–28 March 2002, www.ictp.it/~pub_off/lectures/Ins020/Nichols/Nichols.pdf; G. P. Ford, K. Wolfsberg, and B. R. Erdal, "Independent Yields of the Isomers of ¹³³Xe and ¹³⁵Xe for Neutroninduced Fission of ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁹Pu and ²⁴²Am," *Physical Review C*, 30(1984): 1, 195–213; Isotopes Project of Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) (<http://ie.lbl.gov/toi.html>), Nuclear Data Center of the Japanese Atomic Energy Agency (JAEA) (<http://www.ndc.jaea.go.jp/>), the Nuclear Research and consultancy Group (NRG) (<http://www.nrg.eu/>).
 41. T. R. England and B. F. Rider, "Evaluation and Compilation of Fission Product Yields," 1993, ENDF-349, Los Alamos National Laboratory, (LA-UR-94–3106).
 42. Для быстрых нейтронов в этой компиляции выходы, измеренные в активной зоне реактора на быстрых нейтронах, объединялись с выходами для нейтронов спектра деления. Кроме того, выборочные выходы, измеренные для моноэнергетических нейтронов с энергиями от 0,5 до 2,0 МэВ, объединялись с выходами для нейтронов спектра деления.

43. C. R. Schoengold, M. E. De Marre, and E. M. Kirkwood, 1996, *Radiological Effluents Released from U.S. Continental Tests 1961 through 1992*, Department of Energy, DOE/NV-317.
44. Gunnar Persson, "Fractionation Phenomena in Activity from an Underground Nuclear Explosion," *Health Physics*, 16(1969): 515–523.
45. Chunyan Ma and Frank von Hippel, "Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors," *The Nonproliferation Review*, Spring (2001): 86–101.
46. Очевидно, что в этих вычислениях предполагается, что выброшенным изотопом был Ba-140, в то время как, конечно, им был Xe-140. Так что они не учитывали интервал, в течение которого Xe-137 и Xe-140 превращались в Cs-137 и Ba-140 (через Cs-140). Тем не менее, этот временной масштаб намного короче, чем периоды полураспада Cs-137 и Ba-140, так же как и временное разрешение наборов метеорологических данных.
47. Смотрите Table G.1, in T. Lay et al. , 1997, "Appendix G: Radionuclide Source Term Ranges for Different Test scenarios" in *Research Required to Support Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Monitoring*, Panel on Basic Research Requirements in Support of Comprehensive Test Ban Monitoring, National Academy of Sciences, ISBN: 978-0309-05826-1
48. T. Lay et al. , 1997, op. cit. (ссылка 47)
49. "Radioactivity Detected after N. Korea Nuclear Fusion Claim," in *Chosun Ilbo*, a major daily newspaper in South Korea, 21 June 2010, http://english.chosun.com/site/data/html_dir/2010/06/21/2010062101166.html; "Did NK Conduct a 3rd Nuclear Test in May?," in *The Korea Times*, an English language daily newspaper in South Korea, http://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2010/10/116_74808.html.
50. C. R. Schoengold et al. (1996), op. cit. (ссылка 43)
51. R. H. Nilson, E. W. Peterson, K. H. Lie, N. R. Burkhard, and J. R. Hearst, "Atmospheric Pumping: A Mechanism Causing Vertical Transport of Contaminated Gases Through Fractured Permeable Media," *Journal of Geophysical Research*, 96 (B13) (1991): 21933–21948.
52. Предположительно здесь также должен быть верхний предел для этой доли, определяемый тем фактом, что выброс 100% запаса инертного газа будет маловероятным, поскольку это подразумевает катастрофический выброс из полости взрыва. Верхний предел в 30%, и, следовательно, диапазон 2 – 30%, кажется правдоподобным.
53. Lars-Erik De Geer, частное сообщение, и статья, представленная в *Science & Global Security*.
54. D. K. Smith, 1998, "A Recent Drilling Program to Investigate Radionuclide Migration at the Nevada Test Site," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 235(1–2) (1998): 159–166; Persson (1969), op. cit. (ссылка 44)
55. Lay et al. (1997), op. cit. (ссылка 47)
56. C. F. Smith, "Utilization of the Noble Gases in Studies of Underground Nuclear Detonations," *Proceedings of Noble Gases Symposium*, Las Vegas, Nevada, September 24-25, 1973, UCRL-74710.
57. Хотя данные наблюдений и соответственное моделирование могут независимо использоваться для рассмотрения правдоподобия тайного ядерного испытания 11 мая 2010 года, уместно вспомнить загадочное заявление о «синтезе», сделанное Северной Кореей всего на один день позже (смотрите обсуждение в статье Де Геера). Несмотря на многочисленные насмешки, для этого заявления не было представлено никакого правдоподобного объяснения, но гипотеза ядерного испытания, возможно, подходит ближе всего. Определенное использование термина «термоядерный» в заявлении наводит на размышление и, вероятно, свидетельствует против D-T или D-D синтеза с применением ускорителя. Оно может относиться к синтезу в устройстве с плазменным фокусом, но точно так же оно может указывать на синтез при высокой температуре и давлении при взрыве малой мощности с делением. Примечательно также то, что 9 апреля 2010 года Центральное телеграфное агентство Кореи сообщило, что представитель Министерства иностранных дел Северной Кореи заявил в ответ на недавно опубликованный Обзор ядерной политики США «До тех пор, пока существует ядерная угроза США, КНДР будет увеличивать и обновлять различные типы ядерного оружия в качестве своего сдерживающего средства таким способом, каким это будет необходимо в предстоящие дни». Затем 20 апреля 2010 года международные средства массовой информации сообщили о том, что Северная Корея с февраля готовится к ядерному испытанию и проведет его в мае или июне. В сообщениях цитируются слова анонимного дипломата о том, что технический уровень испытания будет значительно выше, чем у испытаний 2006 и 2009 годов. Аналогично, в ответ на раскрытие американских материалов времен холодной войны о тактическом применении ядерного оружия на Корейском полуострове Центральное телеграфное агентство Кореи 28 июня 2010 года цитировало заявление Министерства иностранных дел о том, что оно подчеркивает «необходимость поддержать средства ядерного сдерживания КНДР новым разработанным способом».

58. OTA 1988, *U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Seismic Verification of Nuclear Testing Treaties*, OTA-ISC-361 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, May 1988).
59. Marvin D. Denny and Dennis M. Goodman, "A Case Study of the Seismic Source Function: Salmon and Sterling Reevaluated," *Journal of Geophysical Research*, 95(B12) (1990): 19705–19723.
60. H. Douglas Garbin, "Coupling of an Overdriven Cavity," *Proceedings of the Numerical Modeling for Underground Nuclear Test Monitoring Symposium*, Los Alamos National Laboratory, 1993, LA-UR-93–3839.
61. Vitaly V. Adushkin, Ivan O. Kitov, O. P. Kuznetsov, and Djamil D. Sultanov, "Seismic Efficiency of Decoupled Nuclear Explosions," *Geophysical Research Letters*, 20(1993): 16, 1695–1698.
62. L. A. Glenn and P. Goldstein, "Seismic decoupling with chemical and nuclear explosions in salt," *Journal of Geophysical Research*, 99 B6 (1994): 11723–11730.
63. Сейсмическая развязка, или декаплинг, остается противоречивой темой, в основном из-за недостатка данных. К открытым вопросам относятся максимально достижимый коэффициент декаплинга DF, зависимость коэффициента DF от мощности взрыва, типа скальной породы и (или) размеров полости, пределов, в которых данные по химическим взрывам могут быть экстраполированы в ядерную область, равенство (или неравенство) локально, регионально или телесеismicки определенных коэффициентов DF, и то, насколько хорошо согласуются моделирование и эксперимент. Например, прошлые эксперименты США и СССР проводились в соли или туфе, но, насколько известно, не было проведено специального эксперимента по сейсмической развязке ядерного взрыва в граните, среде, которая, как полагают, характерна для северокорейского испытательного полигона (однако, смотрите последующие комментарии по событию «Тайни Тот»).
64. Jeffrey L. Stevens, Steven Gibbons, Norton Rimer, Heming Xu, Conrad Lindholm, Frode Ringdal, Tormod Kvaerna, and John R. Murphy, "Analysis and Simulation of Chemical Explosions in Non-Spherical Cavities in Granite," *Journal of Geophysical Research*, 111(2006): B04306.
65. Marvin Denny, Peter Goldstein, Kevin Mayeda and William Walter, "Seismic Results From DOE's Non-Proliferation Experiment: A Comparison of Chemical and Nuclear Explosions", in *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*, NATO Advanced Study Institute, eds. E. S. Husebye and A. M. Dainty, pp. 355–364, 1997, Kluwer Academic Publishers.
66. J. R. Murphy, I. O. Kitov, N. Rimer, V. V. Adushkin, and B. W. Barker, "Seismic Characteristics of Cavity Decoupled Explosions in Limestone: An Analysis of Soviet High Explosive Test Data," *Journal of Geophysical Research*, 102(B12) (1997): 27393–27405.
67. Сразу же после испытаний 2006 и 2009 годов оценки мощности колебались в широких пределах, но обычно они цитировались как 0,5 кт и 2 кт соответственно [Martin B. Kalinowski and Ole Roß, "Analysis and Interpretation of the North Korean Nuclear Test," *INESAP Information Bulletin* 27 (2006): 39–43; Richard L. Garwin and Frank N. von Hippel, "A Technical Analysis of North Korea's Oct. 9 Nuclear Test," *Arms Control Today*, November 2006; Nuclear Explosion Database, http://www.rdss.info/database/nedb/nedb_ent.html, last accessed 9 October 2012]. Они по существу базировались на подстановке усредненной по сети магнитуды объемной Р-волны (m_b) в эмпирическую формулу, связывающую магнитуду с мощностью ($M-Y$). Соответствующая формула имеет вид $m_b = 0,75 \cdot \log_{10} Y + 4,45$, определенной для полигона ядерных испытаний в Семипалатинске и основанной на официально объявленных мощностях проведенных там испытаний [Frode Ringdal, Peter D. Marshall, and Ralph W. Alewine, "Seismic Yield Determination of Soviet Underground Nuclear Explosions at the Shagan River Test Site," *Geophysical Journal International*,; 109(1992): 65–77]. Перенос такого уравнения на полигон NKTS явным образом предполагает те же самые условия размещения, только некоторые из которых могут быть надежно ограничены (например, условия твердой породы). Другие параметры, такие, как масштабированная глубина захоронения и поглощение в твердой мантии были (и могут оставаться) неизвестными, и могут существенно повлиять на предполагаемую мощность. Другие переменные, такие, как алгоритм, используемый для определения m_b и (или) покрытие сейсмической сети, также могут повлиять на предполагаемую мощность. Например, доказательством может служить диапазон m_b , опубликованный для испытания 2006 года от 3,7 до 4,3 [Richard L. Garwin and Frank N. von Hippel, (2006), смотрите выше]. Если принять во внимание некоторые из этих аспектов, то возможный диапазон мощностей расширится до более 2 кт для 2006 года и 4 кт для 2009 года [J. Schlittenhardt, M. Canty, and I. Grunberg, "Satellite Earth Observations Support CTBT Monitoring: A Case Study of the Nuclear Test in North Korea of Oct. 9, 2006 and Comparison with Seismic Results," *Pure and Applied Geophysics*, 167(2010): 4–5, 601–618; Vitaly Fedchenko, "North Korea's Nuclear Test Explosion, 2009," Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) Fact Sheet, December 2009]. Некоторые работы, опубликованные в профессиональной геофизической литературе, продолжают указывать на относительно низкие мощности около 0,5 кт и 2 кт [Michael E. Pasyanos, William R. Walter, and Kevin M. Mayeda, "Exploiting Regional Amplitude Envelopes: A Case Study for Earthquakes

- and Explosions in the Korean Peninsula,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2012): 5, 1938–1948; Lian-Feng Zhao, Xiao-Bi Xie, Wei-Min Wang, and Zhen-Xing Yao, “Yield Estimation of the 25 May 2009 North Korean Nuclear Explosion,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2012): 2, 467–478].
68. David H. Salzberg, 2008, “Semi-empirical Yield Estimates for the 2006 North Korean Explosion,” *2008 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, National Nuclear Security Administration, 658–665; John R. Murphy, Benjamin C. Kohl, Jeffry L. Stevens, Theron J. Bennett, and Hans G. Israelsson, 2010, “Exploitation of the IMS and Other Data for a Comprehensive, Advanced Analysis of the North Korean Nuclear Tests,” *2010 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, National Nuclear Security Administration, 456–465; John R. Murphy, Jeffry L. Stevens, Benjamin C. Kohl, Theron J. Bennett, and Brian W. Barker, 2011a, “Supplemental Analysis of the Seismic characteristics of the 2006 and 2009 North Korean Nuclear Tests,” *2011 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, National Nuclear Security Administration, 513–523; Keith D. Koper, Robert B. Herrmann, and Harley M. Benz, “Overview of Open Seismic Data from the North Korean Event of 9 October 2006,” *Seismological Research Letters*, 79(2008): 2, 178–185; Jessie Bonner, Robert B. Herrmann, David Harkrider, and Michael Pasyanos, “The Surface Wave Magnitude for the 9 October 2006 North Korean Nuclear Explosion,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2008): 5, 2498–2506; Sidao Ni, Don Helmberger, and Arben Pitarka, “Rapid Source Estimation from Global Calibrated Paths,” *Seismological Research Letters*, 81(2010): 3, 498–504; Kin-Yup Chun, Y. Wu, and Gary A. Henderson, “Magnitude Estimation and Source Discrimination: A Close Look at the 2006 and 2009 North Korean Underground Nuclear Explosions,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2011): 3, 1315–1329; Esteban Rougier, Howard J. Patton, Earl E. Knight, and Christopher R. Bradley, “Constraints on Burial Depth and Yield of the 25 May 2009 North Korean Test from Hydrodynamic Simulations in a Granite Medium,” *Geophysical Research Letters*, 38(2011): L16316.
 69. David H. Salzberg (2008), *op. cit.* (ссылка 68)
 70. Koper et al. (2007), *op. cit.* (ссылка 68); Bonner et al. (2008), *op. cit.* (ссылка 68); Ni et al. (2010), *op. cit.* (ссылка 68); Rougier et al. (2011), *op. cit.* (ссылка 68)
 71. В частности, это приведет к лучшему согласию – по сравнению с упрощенной формулой зависимости магнитуды от мощности – мощностей взрыва, определенных по данным сейсмических объемных (короткопериодических) и поверхностных (долгопериодических) волн.
 72. Масштабированная глубина захоронения (SDOB) определяется как глубина захоронения D (в метрах), деленная на кубический корень из мощности взрыва Y (в $\text{кт}^{1/3}$). Используемая в США величина SDOB для полного удержания, примерно равна $122 \text{ м/кт}^{1/3}$, так что реальная глубина захоронения будет равна $D=122 \cdot Y^{1/3}$. В России и бывшем Советском Союзе используются несколько иные формулы, в которые включена зависимость от содержания влаги в среде [OTA 1989, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, The Containment of Underground Nuclear Explosions, OTAISC-414 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, October 1989); Vitaly V. Adushkin and William Leith, 2001, “The Containment of Soviet Underground Nuclear Explosions,” U.S. Geological Survey Open File Report 01-312].
 73. Neil D. Selby, Peter D. Marshall, and David Bowers, “ m_b : M_s Event Screening Revisited,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1) (2012): 88–97.
 74. Наклон этого соотношения m_b - Y не изменится, если мощности будут больше, или меньше, при условии, что отношение мощности будет примерно равно 5. Такое отношение согласуется со всеми данными, включая короткопериодические региональные P_n и P_g волны, которые дают средний диапазон от 3,5 до 6,4 [Tae Sung Kim, Ik-Bum Kang, and Geun-Young Kim, “Yield Ratio Estimates Using Regional P_n and P_g from North Korea’s Underground Nuclear Explosions,” *Geophysical Research Letters*, 36(2009): L22302]. То же относится к магнитудам долгопериодических телесеismicических поверхностных волн M_s , которые тесно группируются около 5, то есть, отношение 2009-к-2006 году 5,6 от $M_s = 2,83 \pm 0,23$ и $3,58 \pm 0,05$ в Selby et al. (2012), *op. cit.* (ссылка 73); отношение мощностей 2009-к-2006 году 4,3 от $2,89 \pm 0,11$ и $3,52 \pm 0,16$ в Chun et al. (2011), *op. cit.* (ссылка 68); отношение мощностей 2009-к-2006 году 5,4 от $2,93 \pm 0,20$ и $3,66 \pm 0,10$ in Murphy et al. (2010), *op. cit.* (ссылка 68) Здесь предполагается «канонический» наклон 1,0 в соотношении M_s - Y [Jeffry L. Stevens and John R. Murphy, “Yield Estimation from Surface Wave Amplitudes,” *Pure & Applied Geophysics*, 158(2001): 2227–2251]. Поэтому, если мощности 2006 и 2009 годов будут выше, чем заявлено здесь, то «ожидаемая» m_b от испытания в 200 тонн будет ниже, и наоборот, если мощности 2006 и 2009 годов будут ниже.
 75. Tormod Kværna, Frode Ringdal and Ulf Baadshaug, “North Korea’s Nuclear Test: The Capability for Seismic Monitoring of the North Korean Test Site,” *Seismological Research Letters*, 78(2007): 487–497.
 76. David P. Schaff, Won-Young Kim, and Paul G. Richards, “Seismological Constraints on Proposed Low-Yield Nuclear Testing in Particular Regions and Time Periods in the Past, with Comments on ‘Radionuclide Evidence for Low-Yield Nuclear Testing in North Korea in April/May 2010’ by Lars-Erik De Geer,” *Science and Global Security*,

- 20(2012): 1, 1–29.
77. D. C. Castagnola and C. L. Carnahan, "Prediction of cavity radius and estimation of cavity gas temperatures produced by a contained underground nuclear explosion," NVO-1229-170, U.S. Atomic Energy Commission Nevada Operations Office, Las Vegas, Nevada, 1971.
 78. W. Leith, "Geologic and Engineering Constraints on the Feasibility of Clandestine Nuclear Testing by Decoupling in Large Underground Cavities," U.S. Geological Survey, Open File Report 01-28, 2001.
 79. D. R. Stephens, 1972, "French-American Technical Exchange of Geologic Information Related to Peaceful Uses of Nuclear Explosives," Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-51171.
 80. John R. Murphy, Theron J. Bennett, and Brian W. Barker, 2011b, "An analysis of the seismic source characteristics of explosions in low-coupling dry porous media," *2011 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, 524–534.
 81. Alexander L. Florence, Steven A. Miller, and Carl E. Keller, "Decoupling of Underground Explosions by Rubble-Filled Cavities," *Journal of Geophysical Research*, 98(1993): (B8) 14197–14209. Эксперименты проводились в лабораторных настольных цилиндрических гранитных столбах, с их размерами и размерами частиц, масштабированных к событиям «Хардхэт» и «Пайлдрайвер», с пористостью 20 – 30 процентов, аналогичных величинам для ядерных событий. В них на основании излученной кинетической энергии были получены коэффициенты недооценки мощности от 30 до 65.
 82. Lynn R. Sykes, "Re-evaluation of Evasion Possibilities for Conducting Nuclear Explosions in Underground Cavities in Former USSR" (1996) Phillips Laboratory Report, PL-TR-96–2073.
 83. Murphy et al. (2011b), *op. cit.* (ссылка 80); Leith (2001), *op. cit.* (ссылка 78)
 84. Leith (2001), *op. cit.* (ссылка 78)
 85. Paul G. Richards and Won-Young Kim, "Seismic Signature," *Nature Physics*, 3(2007): 4–6; Salzberg (2008), *op. cit.* (ссылка 68); Lian-Feng Zhao, Xiao-Bi Xie, Wei-Min Wang, and Zhen-Xing Yao, "Regional Seismic Characteristics of the 9 October 2006 North Korean Nuclear Test," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2008): 6, 2571–2589.
 86. Denny et al. (1997), *op. cit.* (ссылка 65)
 87. David P. Schaff, Won-Young Kim, and Paul G. Richards, (2012), *op. cit.* (ссылка 76)
 88. Kin-Yip Chun, Yan Wu, and Gary A. Henderson, "Lg Attenuation near the North Korean Border with China, Part I: Model Development from Regional Earthquake Sources," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5) (2009a): 3021–3029; Kin-Yip Chun and Gary A. Henderson, "Lg Attenuation near the North Korean Border with China, Part II: Model Development from the 2006 Nuclear Explosion in North Korea," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5) (2009b): 3030–3038.
 89. Tae-Kyung Hong, Chang-Eob Baag, Hoseon Choi, and Dong-Hoon Sheen, "Regional Seismic Observations of the 9 October 2006 Underground Nuclear Explosion in North Korea and the Influence of Crustal Structure on Regional Phases," *Journal of Geophysical Research*, 113(2008): B03305; Tae-Kyung Hong and Junkee Rhie, 2009, "Regional Source Scaling of the 9 October 2006 Underground Nuclear Explosion in North Korea," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2009): 4, 2523–2540; Chun et al. (2011), *op. cit.* (ссылка 68)
 90. Xu Yi, Hao Tianyao, Li Zhiwei, and Liu Jianhua, "Analysis of Lithosphere Structure and Tectonics of Chinese Marginal Seas and Adjacent Regions," *Earth Science Frontiers* 15 (2008): 3, 55–63; Lian-Feng Zhao, Xiao-Bi Xie, Wei-Min Wang, and ZhenXing Yao (2012), *op. cit.* (ссылка 67)
 91. Jianshe Lei and Dapeng Zhao, "P-wave Tomography and Origin of the Changbai Intraplate Volcano in Northeast Asia," *Tectonophysics*, 397(2005): 281–295; M. Nafi Toksoz, Robert D. van der Hilst, Youshun Sun, Chang Li, and Huajian Yao, 2007, "P- and S-wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle Under China and Surrounding Areas from Body and Surface Wave Tomography," *29th Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, National Nuclear Security Administration, pp.302–311; N. A. Simmons, S. C. Myers, G. Johannesson, and E. Matzel, LLNL-G3Dv3: Global P wave Tomography Model for Improved Regional and Teleseismic Travel Time Prediction, *Journal of Geophysical Research*, 117(2012), B10302, doi:10.1029/2012JB009525.
 92. Irina M. Artemieva & Walter D. Mooney, "Thermal Thickness and Evolution of Precambrian Lithosphere: A Global Study," *Journal of Geophysical Research*, 106(B8) (2001): 16387–16414; Yang Wang, "Heat Flow Pattern and Lateral Variations of Lithosphere Strength in China Mainland: Constraints on Active Deformation," *Physics of the Earth & Planetary Interiors* 126 (2001): 121–146; Chan Kim and Youngmin Lee, "Heat Flow in the Republic of Korea," *Journal of Geophysical Research*, 112(2007): B05413.
 93. Richard R. Rapine and James F. Ni, "Propagation Characteristics of Sn and Lg in Northeastern China and Mongolia," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2003): 2, 939–945.
 94. Vernon F. Cormier, "The Effect of Attenuation on Seismic Body Waves," *Bulletin of the Seismological Society of*

- America*, 72(1982): 6, S169–S200.
95. Irina M. Artemieva, Magali Billien, Jean-Jacques Leveque and Walter D. Mooney, "Shear Wave Velocity, Seismic Attenuation, and Thermal Structure of the Continental Upper Mantle," *Geophysical Journal International*, 157(2004):607–628.
 96. Kværna et al. (2007), *op. cit.* (ссылка 75)
 97. David P. Schaff, Won-Young Kim, and Paul G. Richards, (2012), *op. cit.* (ссылка 76)
 98. Соответствующее уравнение $m_b=4,25+0,75 \cdot \log_{10} Y$ было впервые использовано для оценки мощностей ядерных испытаний ≥ 1 кт на Новой Земле [David Bowers, Peter D. Marshall and Alan Douglas, "The Level of Deterrence Provided by Data From the SPITS Seismometer Array to Possible Violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya Region," *Geophysical Journal International*, 146(2001): 425–438]. Сомнительно, чтобы это уравнение было применимо к полигону НКТС. Если нет ничего другого, то наклон должен быть равен 1,0 для мощностей менее 1 кт, поскольку вероятно, что устройство не будет захоронено меньше, чем на масштабированную глубину для взрыва мощностью в 1 кт, независимо от того, была ли намеченная мощность меньше 1 кт. Это может довести предполагаемый нижний предел мощности до 1,4 – 2,8 тонн. В самом деле, Шафф и др. Отметили, станция в Муданьцзяне не смогла обнаружить взрывы 1 тонны взрывчатого вещества, проводившихся на расстояниях, меньших, чем до полигона НКТС.
 99. Hong et al. (2008), *op. cit.* (ссылка 89)
 100. В исторических записях по ядерным испытаниям малой мощности немало прецедентов с отсутствием обнаружения. Даже в 1980-х годах по крайней мере 2 таких секретных испытания не было сейсмически обнаружено. [Robert Standish Norris & Thomas B. Cochran, 1994, "United States Nuclear Tests: July 1945 to 31 December 1992," *Nuclear Weapons Databook NWD 94-1*, Natural Resources Defense Council].
 101. Ringbom et al. (2009a), *op. cit.* (ссылка 21); P. R. J. Saey, M. Bean, A. Becker, J. Coyne, R. d'Amours, L.-E. De Geer, R. Hogue, T. J. Stocki, R. K. Ungar, and G. Wotawa, "A Long Distance Measurement of Radioxenon in Yellowknife, Canada, in Late October 2006," *Geophysical Research Letters*, 34(2007): L20802; Andreas Becker, Gerhard Wotawa, Anders Ringbom and Paul R. J. Saey, "Backtracking of Noble Gas Measurements Taken in the Aftermath of the Announced October 2006 Event in North Korea by Means of PTS Methods in Nuclear Source Estimation and Reconstruction," *Pure & Applied Geophysics*, 167(4-5) (2010): 581–599.
 102. Leith (2001), *op. cit.* (ссылка 78)
 103. Carl W. Smith, 1994, "JUNIOR JADE - Containment Phenomenology of Decoupled Events," Sand94–3238C.
 104. Donald L. Springer, Gayle A. Pawloski, Janet L. Ricca, Robert F. Rohrer, and David K. Smith, "Seismic Source Summary for All U.S. Below-Surface Nuclear Explosions," *Bulletin of the Seismological Society of America* 92 (2002): 5, 1806–1840; C.R. Schoengold et al. (1996), *op. cit.* (ссылка 43)
 105. C. R. Schoengold et al. (1996), *op. cit.* (ссылка 43); Springer et al. (2002), *op. cit.* (ссылка 104); Donald M. Reeves, Karl F. Pohlmann, Greg M. Pohl, Ming Ye, Jenny B. Chapman, "Incorporation of Conceptual and Parametric Uncertainty into Radionuclide Flux Estimates from a Fractured Granite Rock Mass," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(2010): 6, 899–915.
 106. M. L. Merritt, "Ferris Wheel Series: Shot Tiny Tot: Technical Director's Summary Report," 1969, AD-A286600, POR-3021(WT-3021).
 107. De Geer (2012), *op. cit.* (ссылка 1)
 108. Wotawa (2012), *op. cit.* (ссылка 3)