

## РАДИОНУКЛИДЫ, УКАЗЫВАЮЩИЕ НА ЯДЕРНОЕ ИСПЫТАНИЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В АПРЕЛЕ/МАЕ 2010 ГОДА

*Ларс-Эрик де Геер*

Между 13 и 23 мая 2010 года четыре станции наблюдения за радионуклидами в атмосфере в Южной Корее, Японии и Российской Федерации обнаружили радиоактивный ксенон и дочерние радионуклиды ксенона с концентрациями до 10 и 0,1 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. Все эти измерения были сделаны в воздушных массах, проходивших за несколько дней до этого над Северной Кореей. Эта статья показывает, что эти наблюдения радионуклидов согласуются с тем, что в Северной Корее 11 мая 2010 года было проведено ядерное испытание малой мощности, хотя никаких сейсмических сигналов от такого испытания обнаружено не было. В Приложении 1 представлен подробный анализ данных по радиоактивному ксенону и в Приложении 2 приведен гипотетический сценарий ядерного испытания, согласующийся с этим анализом, включая возможность того, что в испытании использовался уран-235, а не плутоний-239. Анализ позволяет предположить, что технический и аналитический базис для обнаружения маломощных ядерных испытаний с использованием сигнатур радионуклидов может быть более развитым, чем это обычно предполагается.

Ларс-Эрик де Геер работает в Шведском оборонном исследовательском агентстве, Стокгольм, Швеция.

Почтовый адрес для корреспонденции: Lars-Erik De Geer, FOI, Swedish Defense Research Agency, SE-164 90, Stockholm, Sweden. Электронный адрес: ledg@foi.se

Статья получена 20 мая 2011 года и принята к публикации 20 октября 2011 года.

Взгляды, выраженные в этой публикации, принадлежат автору, и не обязательно отражают взгляды Шведского оборонного исследовательского агентства, Организации Договора о полном прекращении ядерных испытаний, правительства Южной Кореи, или любой их организаций, вовлеченной в повседневное предоставление данных Международному центру данных. Тем не менее, данные, сделанные доступными из этих источников, высоко оцениваются. Также с благодарностью приветствуется помощь эксперта в применении программного обеспечения WebGage к станции вне ДПЗЯИ, которая была предоставлена д-ром Герхардом Вотава из Центрального института метеорологии и геодинамики в Вене, Австрия.

### ВВЕДЕНИЕ

Северная Корея провела свой первый ядерный испытательный взрыв 9 октября 2006 года. Испытание было проведено под землей в глубоком туннеле<sup>1</sup> и мощность взрыва была оценена приблизительно в 0,9 кт<sup>2</sup>. Его ядерная природа сначала ставилась под сомнение из-за малой мощности, но вскоре она была подтверждена региональными и удаленными обнаружениями изотопов радиоактивного ксенона<sup>3,4</sup> в диапазоне концентраций порядка мБк/м<sup>3</sup>. Затем 25 мая 2009 года было проведено второе ядерное испытание в той же самой системе туннелей внутри горы Мантап примерно в 40 км к северо-востоку от города Килчу в северной части страны. Глубина взрыва была оценена с помощью тщательного сейсмического анализа как приблизительно 200 м для испытания 2006 года и 550 м для испытания 2009 года<sup>5</sup>. Альтернативный анализ базируется на ориентации входа в туннель, который был идентифицирован на снимках со спутника (см., например, на GoogleEarth™ с координатами 41,2808° с.ш. и 129,0856° в.д.), и на сообщении с веб-сайта новостей горнодобывающей отрасли, появившемся незадолго до первого испытания, в котором цитировалось заявление китайского представителя после переговоров с официальными лицами Северной Кореи, указывающее на то, что предстоящее испытание будет проведено в туннеле длиной 2000 м<sup>6</sup>. Это дает пункт испытаний, отстоящий только на 1,5 км от обеих оценок на основе сейсмических данных, который, если предполагать горизонтальный туннель, находился на глубине 800 м под земной поверхностью на вершине горы Мантап.

Мощность второго испытания оценивалась как примерно 4,6 кт<sup>7</sup>, что вместе с тем фактом, что первый взрыв был ядерным, было достаточно для общего согласия с тем, что оно также было ядерным взрывом, хотя в это время радиоактивного ксенона обнаружено не было. Это разочаровало многих представителей сообщества контроля за ядерными вооружениями, но на самом деле это не было таким сюрпризом. Учитывая опыт 2006 года и доступность глубокого пункта испытания, вполне могло быть возможно, что Северная Корея, приложив некоторые дополнительные усилия, остановила в 2009 году практически все утечки, которые могли быть обнаружены вне площадки<sup>8</sup>. Измерения радиоактивного ксенона на площадке будут, однако, предоставлять хорошие шансы для подтверждения испытания. Утечки при понижениях атмосферного давления через трещины и расщелины в скальной породе могут привести к локальным concentra-

циям ксенона-133 на земной поверхности в несколько кБк/м<sup>3</sup> через две недели после ядерного испытания и до нескольких мБк/м<sup>3</sup> даже через четыре месяца после испытания<sup>9</sup>.

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) добивается обуздания гонки ядерных вооружений и их распространения, запрещая испытательные ядерные взрывы во всех средах<sup>10</sup>. Он еще не вступил в силу, поскольку он ожидает ратификации восемью поименованными странами, обладающими ядерными возможностями<sup>11</sup>. В то же время находящийся в Вене Временный технический секретариат (ВТС) Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) строит и эксплуатирует чувствительную глобальную систему верификации, которая нацелена на верификацию договора после того, как он вступит в силу. Среди 321 поста контроля 80 направлены на обнаружение радионуклидов в составе частиц<sup>12,13,14</sup> и в 40 из них также имеются анализаторы инертных газов, которые способны отслеживать два изотопа (ксенон-133 и ксенон-135) и два метастабильных состояния ксенона (ксенон-131m и ксенон-133m), все из которых представляют собой сильные индикаторы процессов деления ядер. Эти изотопы и состояния принадлежат к инертным газам, и их крайне трудно удержать полностью, даже если принимаются меры для предотвращения их выброса, как это может быть в случае тайного испытания. Следует отметить, что во время частого проведения подземных испытаний основными ядерными державами было довольно обычно, когда радиоактивные инертные газы вытекали или просачивались в атмосферу, либо из-за недостатков удержания, либо из-за бурильных операций для взятия образцов для диагностики<sup>15</sup>.

На 1 сентября 2011 года в сети ДВЗЯИ действовало 64 станции для обнаружения радионуклидов в составе частиц и 27 ксеноновых станций<sup>16</sup>.

Многочисленные посты контроля аналогичные, а иногда и идентичные станциям, развернутым ОДВЗЯИ, также существуют во всем мире, и они работают для различным национальных целей, для раннего предупреждения, например, о цунами или о радиологических авариях, или по чисто научным причинам. В сентябре 2007 года Южная Корея открыла национальную систему САУНА<sup>17</sup> в Дзиодзьян на северо-восточной оконечности страны<sup>18</sup>. Система САУНА забирает ксенон в течение 12 часов из потока воздуха примерно в 1 м<sup>3</sup>/час через находящиеся при комнатной температуре колонки с активированным углем<sup>19</sup>, и затем обрабатывает образец в течение при-

мерно 7 часов, чтобы получить небольшой объем ксенона (около 1,1 кубического сантиметра), потенциально содержащего один, или более, членов из вышеупомянутого квартета радиоактивных изотопов ксенона<sup>20</sup>. При обычной продолжительности счета в 11 часов и 10 минут на чувствительной системе совпадений детекторов электронов и гамма-лучей для  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$  и ксенона-133 достигаются минимальные обнаруживаемые концентрации (МОК) в 0,2 мБк/м<sup>3</sup>. Для ксенона-135 МОК выше, около 0,9 мБк/м<sup>3</sup>, из-за более короткого периода полураспада и значительного распада в течение процесса анализа.

### НАБЛЮДЕНИЯ

В мае 2010 года радионуклиды ксенона и их потомки были обнаружены на четырех станциях сбора, расположенных на расстояниях от 10 до 1260 км от границ Северной Кореи (рис. 1)<sup>21</sup>. Все эти обнаружения перечислены в табл. 1<sup>22</sup>.



**Рис. 1:** Корейский полуостров, наблюдаемый с северо-запада, полигон в горе Мантап (в центре), и станции в Уссурийске, Такасаки, Дзидзэин и на Окинаве (слева направо), на которых был обнаружен радиоактивный ксенон и его потомки (цветной рисунок, доступный в сети Интернет).

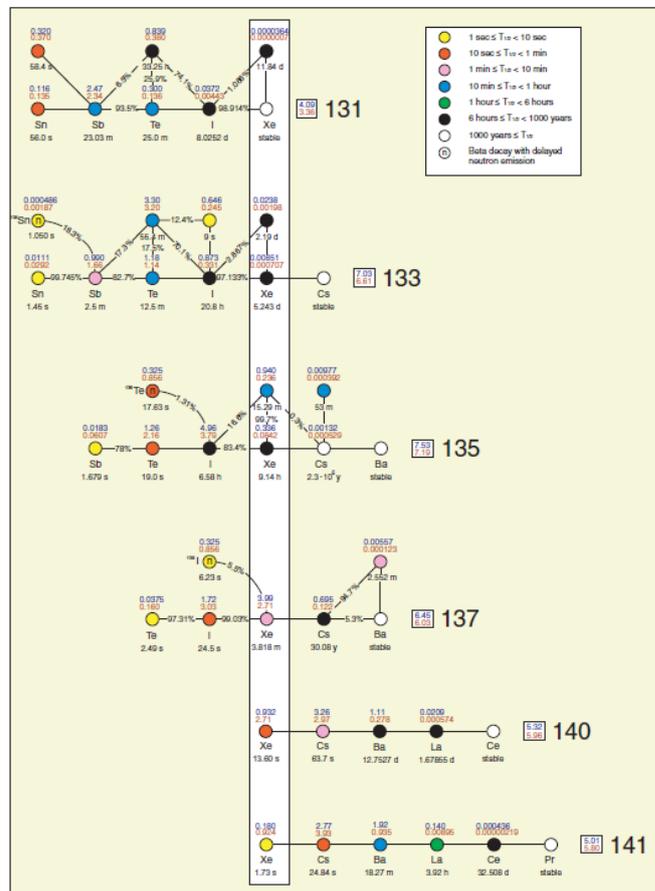
Радиоактивные изотопы ксенона были обнаружены 13 мая 2010 года на южнокорейской национальной обсерватории инертных газов около Дзидзэин прямо к югу от границы с Северной Кореей. Эти результаты были впервые обнародованы представителем правящей партии "Ханнара" Ким Сон-доном<sup>24,25</sup>. Ким заявил, что корейский институт ядерной безопасности обнаружил на станции Дзидзэин концентрацию ксенона-133 в 2,45 мБк/м<sup>3</sup>, и концентрацию ксенона-135 в 10,01 мБк/м<sup>3</sup>, и что "отношение концентраций изотопов инертного газа [ксенона] с 2007 года оставалось меньшим 0,55, но в 2 часа 7 минут после полудня 15 мая внезапно подскочило до 4,085". Значительные уровни сравнительно короткоживущего ксенона-135 (период полураспада 9,14 часа) указывают на относительно недавнее событие<sup>26</sup>. Похожий ксеноновый сигнал ранее на станции Дзидзэин не наблюдался<sup>27</sup>. 15 мая 2010 года на ксеноновом анализаторе станции ОДВЗЯИ САУНА в Такасаки, Япония, начался 2,5-дневный период повышенных уровней ксенона-133<sup>28</sup>. Также 15 мая 2010 года, и также в Японии на фильтровой станции ОДВЗЯИ на Окинаве началась недельная последовательность наблюдений бария-140 и лантана-140<sup>29</sup>. Наконец, 15, 16 и 18 мая 2010 года примерно в десять раз меньшие концентрации бария-140 и лантана-140 наблюдались на фильтровой станции ОДВЗЯИ в Уссурийске, Россия<sup>30</sup>. Барий-140 и лантан-140 никогда не наблюдались на станциях Окинавы и Уссурийска ни до, ни после (за исключением следа аварии на станции Фукусима 11 марта 2011 года). Также и эпизод с ксеноном-133 в середине мая 2010 года на станции Такасаки был уникальным; не столько из-за своего размера, но, возможно, больше из-за своего временного профиля, который указывал, что он не связан с локальным выбросом. Это также поддерживалось метеорологическим анализом, представленном ниже, который указывал на источник в Северной Корее. Наблюдения в Такасаки подтвердили вы-

воды о ядерном испытании малой мощности, но они не являлись обязательными для него.

### ОБНАРУЖЕНИЕ $^{140}\text{Ba}$ ПОДРАЗУМЕВАЕТ МГНОВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ СОБЫТИЯ ВЗРЫВНОГО ДЕЛЕНИЯ

В этой серии наблюдений<sup>31</sup> не было обнаружено никаких радионуклидов, за исключением  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ , и  $^{140}\text{La}$ , и их сигнатуры были уникальными для этих станций. Все четыре станции находились вблизи Северной Кореи, и значительная часть собранных воздушных масс прошла Северную Корею перед тем, как они достигла станций (см. ниже метеорологический анализ). Поэтому вероятно, что эти сигналы были связаны с одиночным источником деления в Северной Корее с одним, или несколькими связанными выбросами изотопов ксенона, и, возможно, других инертных газов.

Рис. 2 показывает цепочки распада, которые включают радиоактивные изотопы ксенона и метастабильные состояния ксенона с периодами полураспада, превышающими 1 секунду, которые образовались при делении и (или) являются дочерними продуктами радионуклидов, непосредственно созданных при делении. На рис. 2 также приведены независимые выходы деления для всех соответствующих изотопов для нейтронов деления, вызывающих деление  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ <sup>32</sup>.



**Рис. 2:** Цепочки распада продуктов деления, включающие изотопы ксенона с периодами полураспада, превышающими 1 секунду. Распад распространяется слева направо через бета-распад и иногда из метастабильного состояния в основное состояние с испусканием гамма-кванта и (или) распада с электронной конверсией (внутренний переход). Символы отмечены цветным кодом для периода полураспада, приведенных под символами, в соответствии с легендой в верхнем углу, коэффициенты ветвления, меньшие 100 процентов, указаны на линиях распада и независимые выходы (в процентах) от быстрых нейтронов, падающих на  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{235}\text{U}$ , указаны над символами синим и красным цветом соответственно. Соответствующие выходы цепочек приведены в квадрате справа (цветной рисунок, доступный в сети Интернет).

В цепочке с массой 140 выброс должен будет состоять из  $^{140}\text{Xe}$ , весьма короткоживущего нуклида (период полураспада 13,6 секунды), и это указывает на мгновенный и селективный выброс инертных газов, наиболее вероятно, вызванный взрывным процессом деления с испарением остающегося расщепляющегося материала для объяснения необходимой быстрой инжекции в атмосферу через нерасщепленное топливо и другие барьеры.

Измерительные станции не обнаружили известные летучие продукты деления, такие, как иод-131, иод-133 или теллур-132. Из этого следует, что должен работать эффективный механизм фильтрации, который удерживает выбросы, отличающиеся от инертных газов. Трудно

представить, как это может случиться в событиях без взрыва, при которых обычно выбрасываются изотопы ксенона, таких, как атомные электростанции или исследовательские реакторы во время запуска, обычной эксплуатации, выключения, заглушки, или даже аварии. Барий-140 также никогда не наблюдался в атмосфере чувствительными системами обнаружения радионуклидов, за исключением ядерного взрыва или крупной аварии на реакторе. В таких случаях, однако, одновременно обнаруживаются многие другие радионуклиды, которые не являются ни инертными газами, ни продуктами распада таких газов.

Табл. 1: Изотопы ксенона и бария, обнаруженные на станциях в Уссурийске, Такасаки, Дзиодзэин и на Окинаве в мае 2010 года. Времена, верхние пределы, и ошибки измерений на станции Дзиодзэин приводятся курсивом, для того, чтобы показать, что они являются оценками, основанными на большом опыте работы с другими спектрами САУНА. Неопределенности приводятся для  $k = 1$ , а верхние пределы основаны на уровне риска для ошибок первого рода в 5 процентов. Все концентрации относятся к предполагаемому постоянному в течение периода сбора, что является стандартным способом, принятым ОДВЗЯИ<sup>23</sup>.

Станция	Начало сбора, UTC	Конец сбора, UTC	$^{131m}\text{Xe}$ МБк/м <sup>3</sup>	$^{133m}\text{Xe}$ МБк/м <sup>3</sup>	$^{133}\text{Xe}$ МБк/м <sup>3</sup>	$^{135}\text{Xe}$ МБк/м <sup>3</sup>	$^{140}\text{Ba}$ мкБк/м <sup>3</sup>
Дзиодзэин	13 мая 11:00	13 мая 23:00	< 0,2	< 0,2	2,45 ± 0,2	10,01 ± 0,6	
Такасаки	15 мая 06:46	15 мая 18:46	< 0,02	< 0,06	< 0,10	< 0,61	
Такасаки	15 мая 18:46	16 мая 06:46	0,04 ± 0,03	< 0,09	0,16 ± 0,07	< 0,57	
Такасаки	16 мая 06:46	16 мая 18:46	0,05 ± 0,03	< 0,08	0,23 ± 0,06	< 0,47	
Такасаки	16 мая 18:46	17 мая 06:46	0,16 ± 0,07	< 0,09	1,49 ± 0,11	< 0,20	
Такасаки	17 мая 06:46	17 мая 18:46	< 0,04	< 0,05	0,52 ± 0,07	< 0,06	
Такасаки	17 мая 18:46	18 мая 06:46	< 0,11	0,10 ± 0,06	0,79 ± 0,09	< 0,58	
Такасаки	18 мая 06:46	18 мая 18:46	0,06 ± 0,03	< 0,02	< 0,10	0,42 ± 0,23	
Такасаки	18 мая 18:46	19 мая 06:46	< 0,07	< 0,05	0,18 ± 0,06	< 0,52	
Окинава	15 мая 00:23	16 мая 00:23					81,9 ± 3,6
Окинава	16 мая 00:23	17 мая 00:23					22,7 ± 2,2
Окинава	17 мая 00:23	18 мая 00:23					27,5 ± 2,2
Окинава	18 мая 00:23	19 мая 00:23					28,1 ± 2,3
Окинава	19 мая 00:23	20 мая 00:23					50,8 ± 2,9
Окинава	20 мая 00:23	21 мая 00:23					43,8 ± 2,8
Окинава	21 мая 00:23	22 мая 00:23					5,2 ± 1,6
Окинава	22 мая 00:23	23 мая 00:23					5,0 ± 1,5
Уссурийск	15 мая 01:44	16 мая 01:44					4,1 ± 1,4
Уссурийск	16 мая 01:44	17 мая 01:44					< 15
Уссурийск	17 мая 01:44	18 мая 01:44					12,2 ± 2,3
Уссурийск	18 мая 01:44	19 мая 01:44					5,3 ± 1,6

Шведская сеть наблюдений за радиоактивными аэрозолями в двух случаях собрала пыль с резко повышенным содержанием  $^{140}\text{Ba}$ . В обоих случаях источниками были неглубокие подземные ядерные взрывы, где радионуклиды в составе частиц облака выделились из падающих вниз обломков, позволив короткоживущему изотопу  $^{140}\text{Xe}$  свободно вытекать, и затем распадаться в  $^{140}\text{Cs}$  и  $^{140}\text{Ba}$ , которые будут прилипать к микроскопическим частицам в воздухе, которые будут переноситься ветрами и смогут быть собраны на больших расстояниях<sup>33,34,35</sup>.

Отношение активности  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  около 4 13 мая 2010 года, сообщенной Ким Сон Донгом указывает, что несколько дней назад это отношение могло быть в сотни раз больше (период уменьшения этого отношения вдвое равен 9,86 часа). Это значение существенно превышает отношение 0,3 - 0,5, которое, согласно расчетам по программе моделирования ядерных систем SCALE/ORIGEN (из Национальной лаборатории в Ок-Ридже), должно быть характерным для реакторов атомных электростанций на тепловых нейтронах при различных степенях выгорания топлива. В реакторе на быстрых нейтронах отношение активности  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , оцениваемое по выходам цепочек, близко к единице<sup>36</sup>. Выбросы также не могут быть связаны с импульсными реакторами, используемыми для исследования деления ядер и радиационных эффектов; эти реакторы становятся критическими только на долю секунды, образуя радиацию и продукты деления. В предположении уранового топлива реактора, отношение активности  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  в этом процессе определяется независимыми выходами деления быстрыми нейтронами и может достигать 1640<sup>37</sup>. Однако, общее количество делений в импульсе невелико (обычно порядка  $10^{16}$  -  $10^{17}$ ), даже при аварии<sup>38</sup>. Это приведет к концентрациям ксенона порядка нБк/м<sup>3</sup>, или примерно в 100 000 раз меньше

пределов обнаружения на станциях сбора (см. ниже обсуждение разбавления в атмосфере).

Оставшимся типом события, которое потенциально может объяснить обнаруженные сигналы радионуклидов, является подземный ядерный взрыв. Однако, ни одна из сейсмических станций в соседних странах, или в другом месте, в это время не обнаружила ничего достаточно подозрительного. Самый мощный хорошо связанный взрыв в Северной Корее, который мог бы остаться не обнаруженным сейсмическими датчиками за пределами страны, оценивается примерно в 50 тонн тротилового эквивалента<sup>39</sup>. В следующих разделах измеренные данные по радионуклидам используются для обсуждения основных характеристик возможного ядерного взрыва, который мог бы привести к сигналам 13 мая и в первые дни после него.

#### ОТНОШЕНИЕ $^{140}\text{La}/^{140}\text{Ba}$ УСТАНОВЛИВАЕТ ДАТУ ВОЗМОЖНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА: 10 ИЛИ 11 МАЯ 2010 ГОДА

$^{140}\text{Xe}$ , образующийся при делении и немедленно выброшенный в атмосферу, в течение нескольких минут распадается через  $^{140}\text{Cs}$  в  $^{140}\text{Ba}$ , который вместе со своим дочерним нуклидом  $^{140}\text{La}$  может быть использован как часы для первой недели, или около того, поскольку отношение активности лантана и бария увеличивается от нуля до равновесного значения 1,152.

Первый измеренный на Окинаве спектр показывает довольно точное значение отношения  $^{140}\text{La}/^{140}\text{Ba}$ , которое дает относительно точную дату и время, в которое произошло деление и выброс. Для того, чтобы получить наиболее точную оценку, используются гамма-линии распада  $^{140}\text{La}$  487,0 кэВ (интенсивность 45,5 процента) и  $^{140}\text{Ba}$

537,3 кэВ (24,39 процента). Тот факт, что эти энергии находятся не очень далеко друг от друга, минимизирует неопределенности от калибровки эффективности. Классические уравнения Бейтмена для цепочек радиоактивного распада дают, после интегрирования по времени счета, следующее уравнение для отношения площадей пиков:

$$\frac{N_{487}}{N_{537}} = \frac{\lambda_{La}}{(\lambda_{La} - \lambda_{Ba})} \frac{B_{487} \varepsilon_{487} ccf_{537}}{B_{537} \varepsilon_{537} ccf_{487}} \left[ 1 - \frac{\lambda_{Ba} e^{-t(\lambda_{La} - \lambda_{Ba})}}{\lambda_{La}} \frac{1 - e^{-t\lambda_{La}}}{1 - e^{-t\lambda_{Ba}}} \right]$$

Здесь  $\lambda_i$  - постоянная распада нуклида  $i$ ,  $B_j$  - коэффициент ветвления  $\lambda$  и  $\beta$  фотона  $j$ , который приведен выше,  $\varepsilon_j$  - эффективность фотопика детектора для фотона  $j$ ,  $t$  - время между событием и началом счета детектора, и  $tc$  - время счета детектора<sup>41</sup>.  $ccf_j$  - это фактор коррекции истинных совпадений для фотона  $j$ , который в тесных геометриях счета применяется для гамма-фотона, который испускается в каскаде с другими гамма-лучами, или там, где имеется несколько параллельных путей распада между начальным и конечным состоянием.  $ccf_j$  зависит также от детектора и геометрии образца, и поэтому он рассчитывается (или измеряется) для каждой индивидуальной комбинации радионуклида и детектора.

Расчеты соответствующих  $ccf_j$  выполнялись для детектора на Окинаве по программе VGSL (Виртуальная лаборатория гамма-спектроскопии), который был разработан в ВТС в Вене<sup>42</sup>. Метод Монте-Карло использовался для моделирования как процесса распада с образованием гамма-лучей, так и переноса фотонов в кристалле детектора и его окружении. По схеме распада  $^{140}\text{Ba}$  фотон с энергией 537 кэВ практически свободен от проблем совпадений, так что  $ccf_{537} = 1$ , в то время как  $ccf_{487}$  для детектора на Окинаве, согласно расчетам по программе VGSL, равен  $1,2340 \pm 0,0002$ . Построенная в США система детектора RASA (Сборщик и анализатор аэрозольных радионуклидов), установленный на Окинаве, показан на рис. 3, где можно видеть, как фильтр плотно обернут вокруг цилиндра с детектором внутри. Тщательное описание материалов и геометрии системы детектора крайне важно для расчета точных факторов коррекции. Отношение эффективностей  $\varepsilon_{487}/\varepsilon_{537}$  установки детектора на Окинаве равно 1,061. Площадь гамма-пика с энергией 487 кэВ соответственно уменьшается на 0,13 процента и 0,54 процента из-за слабых линий примерно с той же энергией в распадах дочерних нуклидов природного радона таллия-208 и свинца-214, которые присутствуют в фильтре.

Рис. 4 иллюстрирует процесс определения даты, базирующийся на образце, собранном 15 мая 2010 года на Окинаве, который представляет самый ранний и самый сильный сигнал, и для которого определено отношение  $N_{487}/N_{537} = 1,65 \pm 0,07$  ( $k = 1$ )<sup>43</sup>. Время деления, определенное таким образом, равно 06:00 11 мая UTC 2010 года +18 часов/-30 часов, что соответствует интервалу от 00:00 часов 10 мая 2010 года до 00:00 часов 12 мая 2010 года<sup>44</sup>. Следует отметить, что если в анализе пренебречь коррекцией истинных совпадений, то начало временного интервала переместится вперед к 14:00 13 мая 2010 года, т.е. на 3 дня и 14 часов позже. Это показывает, что тщательная коррекция на истинные совпадения в гамма-спектроскопии может быть очень критичной.

### Другой индикатор: цезий-137 от распада инертного газа

Считается, что радионуклиды  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{140}\text{La}$  были обнаружены на Окинаве как дочерние продукты мгновенно выброшенного изотопа инертного газа  $^{140}\text{Xe}$ . Возникает вопрос, должны ли были в фильтрах на Окинаве обнаружены другие дочерние продукты распада инертного газа в составе частиц?

Цепочки распада ксенона от деления с периодами полураспада более 1 секунды на рис. 2 показывают, что кроме  $^{140}\text{Ba}$  и  $^{140}\text{La}$ , имеются только  $^{137}\text{Cs}$  с хорошо известной линией 661,7 кэВ (85,1 процента) и периодом полураспада 30,1 года, и  $^{141}\text{Ce}$  с линией 145,1 кэВ (48,3 процента) и периодом полураспада 32,1 дня, которые являются обнаруживаемыми не газообразными дочерними продуктами изотопа ксенона. Кроме того, при делении

образуется много изотопов криптона с периодами полураспада более 1 секунды. Однако, среди них только у криптона-91 с периодом полураспада 8,57 секунды и криптона-93 с периодом полураспада 5,84 секунды имеются дочерние продукты, которые в принципе можно было бы обнаружить на Окинаве (с периодом полураспада более 6 часов и максимальной интенсивностью гамма-распада более 1 процента). Это стронций-91 (период полураспада 9,63 часа) с его наиболее заметной линией 555,6 кэВ (62 процента) и иттрий-93 (период полураспада 10,18 часов) с линией 947,1 кэВ (2,1 процента).

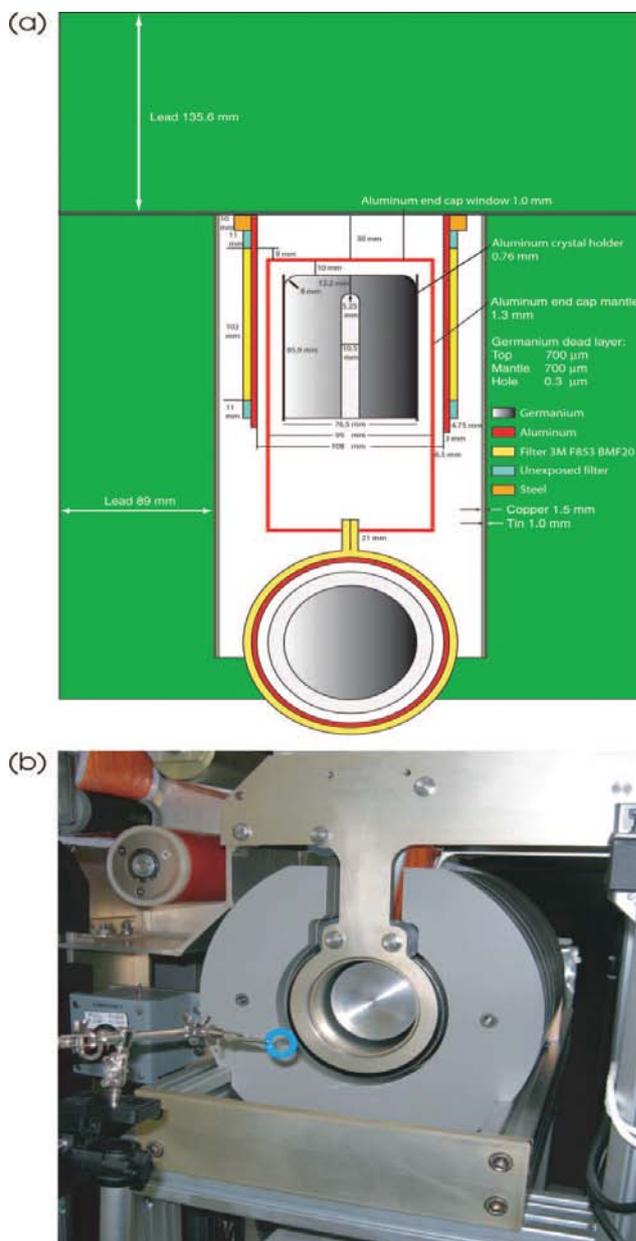
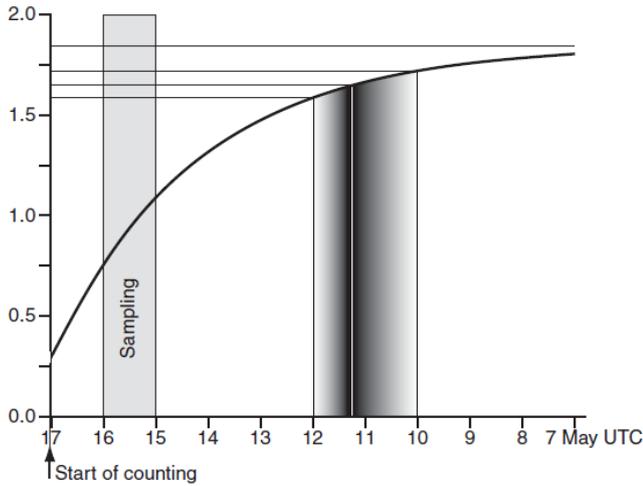


Рис. 3: Детектор на Окинаве, открытый спереди с экспонированным фильтром, окружающим цилиндрическую поверхность вокруг корпуса детектора (b). Тесная конфигурация источника и детектора приводит к тому, что фотоны, которые излучаются одновременно, подобно всем фотонам с энергией 487 кэВ при распаде лантана-140, которые непосредственно сопровождаются фотоном с энергией 1596 кэВ, имеют хорошие шансы попасть в детектор в одно и то же время, и поэтому поднять импульс до уровня, соответствующего более высокой энергии, одновременно уменьшая количество импульсов для энергий 487 и 1596 кэВ. Фото предоставлено Подготовительной комиссией ОДВЗЯИ. Чертеж (a) показывает вид сверху и спереди (цветной рисунок, доступный в сети Интернет). Надписи на рисунке (a) (сверху вниз): 1 - свинец

135,6 мм; 2 - алюминиевая крышка 1 мм; 3 - алюминиевый держатель кристалла 0,76 мм; 4 - алюминиевая крышка корпуса 1,3 мм; 5 - мертвый слой германия: 700 мкм сверху, 700 мкм сбоку, 0,3 мкм в отверстии; 6 - германий; 7 - алюминий; 8 - фильтр; 9 - неэкспонированный фильтр; 10 - сталь; 11 - медь 1,5 мм; 12 - олово 1,0 мм; 13 - свинец 89 мм.



**Рис. 4:** Отношение площадей пиков отношения  $^{140}\text{La}$  (487 кэВ) и  $^{140}\text{Ba}$  (537 кэВ) в зависимости от возраста в предположении мгновенного выброса  $^{140}\text{Xe}$ . Измеренное отношение  $1,65 \pm 0,07$  ( $k = 1$ ) в образце на Окинаве соответствует дате и времени выброса 06:00 11 мая UTC 2010 года +18 часов/-30 часов.

На основании кумулятивных выходов деления для инертных газов и эффективностей детекторов при нормировке на площадь пика для линии 537,3 кэВ  $^{140}\text{Ba}$  могут быть оценены ожидаемые площади этих пиков для спектров, полученных на Окинаве. Выше предела обнаружения  $L_D$  попадает только пик  $^{141}\text{Ce}^{45,46}$ . В первом спектре ожидаемые площади пиков превышали предел обнаружения для деления плутония и урана соответственно в 2,2 и 3,8 раза. Тот факт, что  $^{141}\text{Ce}$  не был обнаружен, может объясняться периодом полураспада его ксенонового предшественника в 1,7 секунды, что может не дать вытекающему газу достаточно времени для выхода из области испытания.

Для  $^{137}\text{Cs}$  ожидаемые площади пиков составляют 0,2 (Pu) и 0,6 (U) величины предела обнаружения  $L_D$ . Этот долгоживущий нуклид имеет ксенонового предшественника с периодом полураспада 3,818 минуты и может получить значительное преимущество от более поздних повторных измерений в лаборатории. Так и произошло в случае образцов, полученных на Окинаве. Обычно образцы, где были обнаружены по крайней мере два так называемых относящихся к ДВЗЯИ радионуклида<sup>47</sup> (по крайней мере один из которых является продуктом деления) разделяются и посылаются в две случайно выбранные сертифицированные лаборатории ДВЗЯИ<sup>48</sup>. Поскольку радиоактивность от дочерних продуктов радона обычно распадается, когда образец поступает в лабораторию, и могут быть применены более длительные времена счета, то чувствительность в лаборатории для относительно долгоживущих нуклидов, которые переживают время транспортировки в лабораторию, увеличивается. Для первого образца с Окинавы две лаборатории сообщили результаты для  $^{137}\text{Cs}$  в  $0,45 \pm 0,03$  мкБк/м<sup>3</sup> и  $0,44 \pm 0,24$  мкБк/м<sup>3</sup>; для второго образца одна лаборатория сообщила результат  $0,24 \pm 0,09$  мкБк/м<sup>3</sup>. Для пятого образца (19 - 20 мая 2010 года) сообщалось об обнаружении  $0,35 \pm 0,07$  мкБк/м<sup>3</sup>, и для последующего образца одна лаборатория сообщила об идентификации, но воздержалась от количественной оценки. Такая картина напоминает ситуацию с  $^{140}\text{Ba}$ , что придает доверие выводу о том, что обнаруженный цезий действительно произошел от того же самого выброса инертного газа.

#### АНАЛИЗ СИГНАТУРЫ РАДИОАКТИВНОГО КСЕНОНА

Когда был проведен подробный анализ сигнатуры радиоактивного ксенона на станции Дзиодзьян от 13 мая 2010 года, стало ясно, что этот ксенон не является таким, какого можно было ожидать от простого мгновенного и не измененного выброса радиоактивного ксенона от ядерного взрыва. Отношение активностей  $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$  показывает, что газ был в основном "девственным"<sup>49</sup>, и что отсутствие обнаружения  $^{133m}\text{Xe}$  представляет проблему, которая может быть решена только в предположении, что полость испытания была ранее загрязнена ксеноном-133. Окончательно, было показано, что ксенон-133, если он был связан с взрывом, как это можно предположить из-за довольно уникального сигнала и метеорологического анализа, должен был покинуть область испытания на несколько более поздней стадии, например, во время доступа в полость для диагностических целей. Эти три факта более подробно объясняются и анализируются в Приложении 1.

Затем в Приложении 2 описывается сценарий испытания, который может объяснить все наблюдения. Надо сказать, что это гипотетический сценарий, но он демонстрирует, что обнаруженные сложные сигнатуры не являются несовместимыми с испытанием малой мощности в Северной Корее весной 2010 года. Он позволяет более точно привязать время испытания к 11 мая 2010 года и он указывает, что используемый расщепляющийся материал был ураном-235, а не плутонием-239.

#### МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКИ РАЗМЕРА ВЫБРОСОВ

Для того, чтобы определить, что описанные выше наблюдения радионуклидов могут относиться к потенциальным выбросам в Северной Корее около 11 мая 2010 года, была использована программа метеорологического отслеживания с возвратом WebGrare. Программа WebGrare была разработана в ВТС для того, чтобы помочь странам-участницам искать области источника, согласующиеся с наблюдениями на сети обнаружения радионуклидов ДВЗЯИ<sup>50</sup>. Программа использует наблюдения погоды, которые регулярно анализируются и принимаются Европейским центром среднесрочных предсказаний погоды (ЕЦСПП) в Рединге, Англия, для расчета потенциальных точек расположения источника на земном шаре, которые связаны с исчезающими так называемыми числами чувствительности источника-приемника. Следуя обнаружению с возвратом по времени, рассчитываются и наносятся на карту факторы разбавления, которые соотносят средние наблюдаемые концентрации в течение заданного времени сбора на заданной станции с возможными мгновенными выбросами на земном шаре.

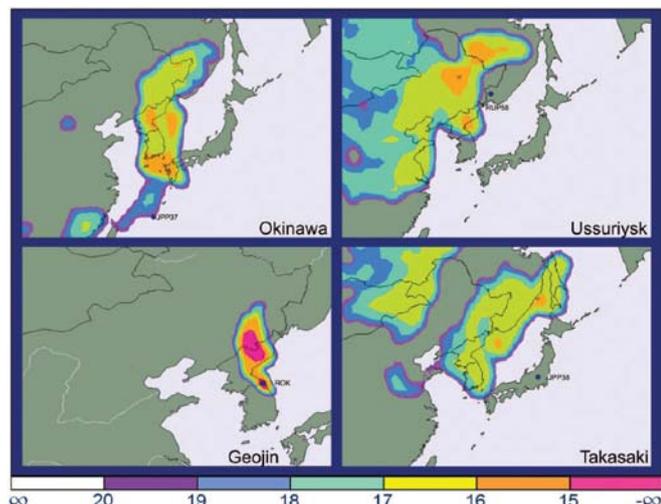
По программе WebGrare для Окинавы, Уссурийска, Дзиодзьян и Такасаки были рассчитаны так называемые поля отношения. Некоторые результаты приведены на рис. 5, где обнаружения  $^{140}\text{Ba}$  на Окинаве и в Уссурийске были исследованы для временного периода выброса от 09:00 до 12:00 11 мая 2010 года, а обнаружения радиоактивного ксенона в Дзиодзьян и Такасаки были использованы для того, чтобы увидеть, могут ли задержанные выбросы привести к обнаружению радиоактивного ксенона в Дзиодзьян и Такасаки. Задержки были оценены в примерно 35 и 48 часов соответственно с помощью средства в программе WebGrare под названием Область возможного источника (ОВИ), которая рассчитывает карту источника, оптимизированную для подгонки к нескольким обнаружениям, а также к их отсутствию. В целом, рис. 5 довольно четко показывает, что общий источник измеренных нуклидов, возможно, находится в Северной Корее. Эти расчеты не являются достаточно точными для того, чтобы точно расположить источник даже если подозреваемые площадки, подобные горе Мантап ( $41,30^\circ$  с.ш.,  $129,08^\circ$  в.д.), и Хагап<sup>51</sup> ( $40,08^\circ$  с.ш.,  $126,19^\circ$  в.д.) для взрывов, и, возможно, Йонбену ( $39,80^\circ$  с.ш.,  $125,74^\circ$  в.д.) для привлеченной лаборатории находятся внутри возможных районов источников на картах. Более подробное исследование метеорологического переноса вперед по времени от подозреваемых источников, возможно, гораздо лучше локализует точку выброса.

Из факторов разбавления на рис. 5 можно будет сделать некоторые общие выводы по размерам выбро-

сов. Для измерения А Бк/м<sup>3</sup> обнаружившего продукт деления с периодом полураспада Т и соответствующим выходом Y процентов через t дней после взрыва, соответствующий выброс, измеренный в тоннах тротилового эквивалента, можно будет записать как:

$$8,64 \cdot 10^6 \cdot A \cdot T \cdot e^{-t \ln 2} / [\ln 2 \cdot Y \cdot N \cdot 10^{-d}]$$

где 10<sup>-d</sup> - фактор разбавления в 10<sup>-d</sup> и N = 1,45 · 10<sup>20</sup> делений на 1 т тротилового эквивалента.



**Рис. 5:** Дифференциальные поля отношения, рассчитанные по программе WebGrate для указанных станций (Окинава - вверху слева, Уссурийск - вверху справа, Дзюдзэин - внизу слева, и Такасаки - внизу справа); для Такасаки был выбран образец с максимальной концентрацией ксенона-133. Верхние изображения относятся к выбросу между 09:00 и 12:00 11 мая 2010 года UTC (т.е. между 18:00 и 21:00 11 мая 2010 года KST), изображение для Дзюдзэин относится к выбросу на 35 часов позже и изображение для Такасаки к 13 часам после этого. Цветовая шкала указывает на *d* в факторе разбавления 10<sup>-d</sup> м<sup>-3</sup>(Бк · м<sup>-3</sup>/Бк). Отметим, что меньшее *d* означает меньшую силу источника, и что контурные линии могут что-то сказать о вероятности расположении источника только тогда, когда имеются предварительные ограничения на силу источника (цветной рисунок, доступный в сети Интернет).

В табл. 2 показаны результаты для всех четырех площадок обнаружения. Поскольку неизвестно, где именно происходило испытание (хотя рис. 5 показывает, что горные районы на севере выглядят вполне приемлемыми), для каждой станции были выбраны три наиболее центральных фактора разбавления. Для мгновенного выброса оценки для Окинавы и Уссурийска вполне согласуются друг с другом на уровне примерно в одну тонну, в пределах фактора порядка 10. Оценка для Дзюдзэин аналогична, но оценка для Такасаки указывает на больший на порядок величины выброс. Очевидно также, что импульс для Такасаки не является "девственным", т.е., он не был прямо произведен в событии деления, поскольку это привело бы к нереально высокой оценке выброса от 10<sup>3</sup> до 10<sup>6</sup> тонн. Это означает, что было по крайней мере три различных выброса, мгновенный, захваченный в Окинаве и в Уссурийске, "девственный", захваченный в Дзюдзэин, и "не девственный", обнаруженный в Такасаки. Выбросы составляют от 1 до 10 процентов от возможных выходов, обсуждающихся в Приложении 2.

## ВЫВОДЫ

Из наблюдений на сети радионуклидов ДВЗЯИ и на одном национальном poste контроля радионуклидов в Южной Корее следует, что в Северной Корее 11 мая 2010 года могло быть проведено подземное ядерное испытание. Для того, чтобы объяснить сигналы радиоактивного ксенона и его дочерних радионуклидов, необходимо рассмотреть три различных выброса от такого испытания,

один мгновенный, один мгновенно отсеченный от его йодных предшественников, и позднее выброшенный в атмосферу, и третий выброс, который произошел еще позже. Первый выброс был обнаружен по значительным уровням бария-140 и (или) лантана-140 на Окинаве в Японии и в Уссурийске в России, второй выброс был обнаружен по ксенону-133 и ксенону-135 в Дзюдзэин в Южной Корее, и третий выброс - по ксенону-133 в Такасаки в Японии. Датировка предполагаемого ядерного испытания была выведена из анализа отношения <sup>140</sup>La/<sup>140</sup>Ba, где корректная трактовка суммирования истинных совпадений в детекторе была инструментальной. Низкий, или даже отсутствующий, сигнал <sup>133m</sup>Xe в Дзюдзэин может быть объяснен только значительным предшествующим загрязнением площадки испытания, например, испытанием, ранее проводившимся в той же самой камере. Это было подтверждено официальным сообщением Северной Кореи от 12 мая 2010 года, в котором сообщалось об успешном ядерном эксперименте 15 апреля 2010 года, а также обнаружениями некоторых радионуклидов в Японии в середине и конце апреля 2010 года. Сигнал радиоактивного ксенона в Дзюдзэин указывает, что в заряде, испытанном 11 мая 2010 года, в качестве расщепляющегося топлива использовался уран-235.

Испытание в мае 2010 года не было обнаружено ни одной сейсмической станцией или сетью, и поэтому его мощность должна быть довольно мала (менее 50 тонн тротилового эквивалента, или, возможно, до примерно 200 тонн, если предположить некоторую развязку). Тот факт, что такие эксперименты все еще обнаруживаются при помощи другой технологии в развивающейся сейчас системе верификации ДВЗЯИ, а также на национальном poste контроля, позволяет предположить, что для стран, отказывающихся ратифицировать ДВЗЯИ под предлогом сомнительной эффективности режима его верификации, остается все меньше оснований. Он также показывает, что система верификации ДВЗЯИ иногда способна обнаружить подземные ядерные взрывы существенно меньшей мощности, чем это ожидалось, когда договор был открыт для подписания 15 лет назад.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1: АНАЛИЗ СИГНАТУР РАДИОАКТИВНОГО КСЕНОНА

Наблюдения радионуклидов в мае 2010 года в Южной Корее, Японии и России указывают на взрывное событие деления; но они не согласуются с обнаружениями одиночного, мгновенного и не измененного выброса радиоактивного ксенона от такого взрыва. Требуется более сложное объяснение. Ксенон-133 и ксенон-135, обнаруженные в Дзюдзэин 13 мая 2010 года анализируются ниже, и делается вывод о том, что этот ксенон был произведен непосредственно в процессе деления (т.е., он является "девственным" ксеноном. Отсутствие обнаружения <sup>133m</sup>Xe порождает проблему, которая может быть решена только в предположении того, что полость испытания ранее была загрязнена ксеноном-133. Наконец, показано, что ксенон-133, обнаруженный в Такасаки, если он был связан с испытанием, как это предполагается по форме импульса и по метеорологическому анализу, должен быть выброшен из среды испытания на несколько более поздней стадии, например, во время вскрытия полости испытания для целей диагностики после испытания.

### Высокое отношение активности <sup>135</sup>Xe/<sup>133</sup>Xe предполагает выброс "девственного" ксенона

В Дзюдзэин было измерено отношение <sup>135</sup>Xe/<sup>133</sup>Xe, равное 4,1 ± 0,4. Для анализа этого наблюдения необходимо скорректировать соотношения концентрации назад, или несколько вперед по отношению к времени счета. В системах радионуклидов ДВЗЯИ и САУНА сырые спектральные данные всегда корректируются к предполагаемой постоянной концентрации в воздухе во время счета. Для точного сравнения измеренных данных по радиоактивному ксенону и теоретических расчетов потребуется отменить эту коррекцию, умножив сообщенные концентрации на коэффициент

$$\frac{1}{\lambda^2 \cdot ts \cdot tc} \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot ts} \right] e^{-\lambda \cdot tp} \left[ 1 - e^{-\lambda \cdot tp} \right]$$

где  $ts$ ,  $tp$ , и  $tc$  - времена сбора, обработки и счета, а  $\lambda$  - постоянная распада.

Теоретически скорректировать, и, следовательно аннулировать коррекцию для ксенона-133 несколько более сложно, потому что он образуется из  $^{133m}\text{Xe}$ , но в стандартных измерениях САУНА этот эффект намного меньше 1 процента, и поэтому здесь он очевидно несущественен. Для САУНА  $ts$ ,  $tp$ , и  $tc$  обычно равны 12 часам, 7 часам, и 11 часам 10 минутам, соответственно.

**Табл. 2:** Утечки, оцененные по данным на четырех площадках обнаружения, выраженные в тоннах тротилового эквивалента. Были использованы совокупные выходы при делении, за исключением станции в Дзюдзьяин, где был применен независимый выход для оцениваемой доли "девственного" ксенона. Значения приводятся для деления плутония и урана и трех самых центральных разбавлений  $10^{-d}$  на рис. 5.

	Окинава	Уссурийск	Дзюдзьяин	Такасаки
Активность (Бк)	$8,19 \cdot 10^5$	$1,22 \cdot 10^5$	$2,45 \cdot 10^3/46$	$1,49 \cdot 10^3$
Нуклид	барий-140	барий-140	ксенон-133	ксенон-133
T (дни)	12,7537	12,7537	5,243	5,243
t (дни)	4,2	3,8	2,4	5,8
Y(%) (Pu; U)	0,932; 2,71	0,932; 2,71	0,00851; 0,000707	0,00851; 0,000707
<b>d</b>				
12			0,005; 0,059	
13			0,05; 0,59	
14			0,5; 5,9	
15	0,042; 0,12			
16	0,42; 1,2	0,0059; 0,020		2,1; 2,2
17	4,2; 12	0,059; 0,20		21; 22
18		0,59; 2,0		210; 220

Усредненное по спектру отношение для  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  в  $1,18 \pm 0,12$  представляется слишком высоким, если сравнить его с соответствующим теоретическим значением в выбросе с полным выходом от предшественников. От деления как плутония, так и урана, оно изменяется в пределах от 0,021 до 0,64, если перемещать событие вперед по времени в интервале, определенном по датировке по  $^{140}\text{La}/^{140}\text{Ba}$ . Не очень правдоподобной причиной может быть то, что время взрыва было на 9 часов после верхней границы этого интервала, или около 9:00 12 мая 2010 года; такому сценарию также противоречит другая информация, обсуждаемая в Приложении 2.

В следующем разделе будет показано, что значительная часть ксенона-133, обнаруженного в Дзюдзьяин, должна будет прийти от постороннего источника. Это должно будет дать еще большее значение усредненного по спектру отношения  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , что, в свою очередь, позволит предположить даже более короткое время обрезания, и даже больший "девственный" выброс от взрыва около 11 мая 2010 года.

#### Низкое отношение активности $^{133m}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ в Дзюдзьяин предполагает посторонний $^{133}\text{Xe}$

На станции Дзюдзьяин не было обнаружено никакого  $^{133m}\text{Xe}$ , что означает, что его концентрация была меньше  $0,2 \text{ мБк/м}^3$  (табл. 1). Это дает, что отношение активностей  $^{133m}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  было меньше, чем  $0,2/(2,45 - 0,2) = 0,089$ . После умножения на коэффициент коррекции 0,8684, определенный таким же способом, как коэффициент для обсуждавшегося выше отношения  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , эта величина будет соответствовать отношению активностей  $^{133m}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  меньше, чем 0,077. Для этого отношения взрыв в 06:00 11 мая 2010 года и обрезание предшественника на 15 минутах, которые соответствуют отношению  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , расчеты по Бейтмену дают отношение в  $0,65 \pm 0,20$  для плутония и  $0,20 \pm 0,03$  для урана, что соответственно в 8,4 и 2,6 раза выше, чем верхняя граница наблюдения. Соответствие двух отношений поэтому представляется невозможным.

Но возможно, что, если предположить, что существенная часть долгоживущего ксенона-133 была выброшена источником, отличающимся от взрыва около 11 мая 2010 года. Для того, чтобы связать его с взрывом 11 мая, отношение  $^{133m}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  должно быть увеличено, чтобы

При таком графике рассчитанный коэффициент коррекции для отношения активностей  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  равен 0,2884. Это дает так называемое среднее по спектру активности соотношение концентраций  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  в образце Дзюдзьяин  $^{52}(4,1 \pm 0,4) \cdot 0,2884 = 1,18 \pm 0,12$ . Это значение можно удобно сравнить с полным расчетом по Бейтмену, основанному на заданных сценариях. Для проведения такого расчета была написана программа в пакете Mathematica®, которая во всех подробностях трактует все ветви в интересующих цепочках распада<sup>53</sup> на основании входных данных из ENSDF<sup>54</sup> и JEFF 3.1.1<sup>55</sup>, как это показано на рис. 2.

оно соответствовало расчетам. И, так отмечалось выше для отношения  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , это только "сделает образец Дзюдзьяин, относящийся к взрыву 11 мая" более "девственным".

#### Ксенон в Такасаки должен прийти от задержанного выброса

Радиоактивный ксенон и его дочерние продукты были обнаружены в середине мая на четырех различных площадках от 300 до 1500 км от центральной Северной Кореи от южных до северо-восточных направлений (рис. 1). На трех из этих станций установлены приборы либо для частиц, либо для инертных газов. Станция в Такасаки оборудована как системой САУНА для ксенона, так и системой RASA для частиц, и обе они работали в соответствующее время. На системе САУНА был обнаружен заметный импульс ксенона-133 в  $1,5 \text{ мБк/м}^3$ , хотя на второй не удалось увидеть никаких следов  $^{140}\text{Ba}$ . В гипотезе выброса инертного газа  $^{140}\text{Ba}$  должен происходить от мгновенного выброса и отношение активностей  $^{140}\text{Ba}/^{133}\text{Xe}$ , базирующееся на независимых выходах без всякого прироста от предшественников с возрастом около 6 дней должно оставаться равным примерно 100 в предположении деления плутония и примерно 1300 в предположении деления урана. Это дает ожидаемую концентрацию  $^{140}\text{Ba}$  в  $0,15$  и  $2,0 \text{ Бк/м}^3$  соответственно, что в от 10 000 до 100 000 раз выше предела обнаружения. Это означает, что наблюдавшийся в Такасаки ксенон не может происходить от мгновенного выброса от ядерного взрыва около 11 мая 2010 года. Однако, задержанный выброс, например, в связи с каким-либо доступом в полость испытания, является полностью согласующимся с данными.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 2: ГИПОТЕТИЧЕСКИЙ СЦЕНАРИЙ ИСПЫТАНИЯ

Комплексная интерпретация представленных здесь наблюдений радионуклидов в мае 2010 года поднимает вопросы о том, могут ли эти результаты быть объяснены в реалистическом сценарии ядерного испытания. Конечно, нельзя утверждать, что гипотетический сценарий будет правильным во всех подробностях, но построение такого сценария, который объяснил бы все наблюдения, укрепит доверие к основной интерпретации.

Кроме того, имеется подтверждающая информация, которую можно учесть, такая, как официальное сообщение в новостях Северной Кореи от 12 мая 2010 года об успехе "в реакциях синтеза". Это сообщение также предлагает объяснение постороннего ксенона-133 в образце из Дзюдзьян, поскольку в нем говорится, что эти "реакции" произошли 15 апреля 2010 года. Это подтолкнуло к тщательному поиску подтверждающих свидетельств ядерного испытания в районе этого дня и два таких события было действительно найдено.

#### Сообщение "Нодон Синмун" от 12 мая 2010 года

12 мая 2010 года северо-корейская официальная ежедневная утренняя газета *Нодон Синмун* сообщила, что "ученые КНДР достигли успеха в реакции *ядерного синтеза* в значительном событии в День Солнца" (курсив добавлен)<sup>57</sup>. Этот отчет был опубликован всего за один - три дня до того, как ксенон и его дочерние нуклиды начали наблюдаться на станциях к югу, западу и северо-востоку от Северной Кореи. Это кажется согласующимся с тем заключением, что в этот период в Северной Кореи был произведен ядерный взрыв.

Одной из проблем при идентификации взрыва 10 или 11 мая с событием, о котором сообщалось правительством Северной Кореи, является то, что газета упоминает о событии в "День Солнца" (15 апреля, на один месяц раньше), который является общенациональным праздником КНДР<sup>58</sup>. Принимая эту информацию буквально, следует, тем не менее, изучить возможность того, что ядерное испытание действительно было проведено в День Солнца. Такое испытание могло оставить не газообразные продукты деления запертыми в полости испытания, а предшественники ксенона-133 имели бы достаточное время в течение месяца полностью перейти в ксенон-133. Ксенон-133, конечно, может распасться в течение этого месяца, но его значительная часть все еще останется для того, чтобы присоединиться к "девственному" доле ксенона в мае. Последующее испытание 10 или 11 мая, возможно в некоторых отношениях более успешное, могло затем, с небольшим отклонением от истины, быть упомянуто как успех в особый День Солнца, как это, возможно, планировалось поначалу. Другие изотопы ксенона могли быть не обнаружены в середине мая либо из-за сравнительно малых периодов полураспада (<sup>133m</sup>Xe и <sup>135</sup>Xe), либо из-за очень малого выхода (<sup>131m</sup>Xe).

Проведение второго испытания в полости от предыдущего испытания не было беспрецедентным<sup>59</sup>; как минимум, этот метод применялся в прошлом в Советском Союзе<sup>60</sup>. Полость может также быть расширена до размера, который предоставит некоторые возможности развязки. Для сферических полостей в различной среде с радиусом 3,42 м/кт<sup>1/3</sup> (это соответствует 2,0 м для взрыва в 0,2 кт) были предсказаны факторы частичной развязки до 1,4<sup>61</sup>. Поскольку соотношение размеров объема не является критическим<sup>62</sup>, полость вполне может быть цилиндрической галереей диаметром 2 м и длиной 10 м, что-то вроде того, что легко может быть подготовлено в горном туннеле, или, возможно, в старой полости после одного из двух первых испытаний в Северной Кореи. При нескольких больших, но все еще разумных размерах, можно будет достичь фактора развязки около 4, что означает, что испытательный взрыв в Северной Кореи до примерно 4 × 50 = 200 тонн может быть проведен без обнаружения иностранными сейсмическими станциями и сетями. Проведение нескольких испытаний малой мощности в одной и той же полости может также иметь экономическое значение, поскольку после нескольких испытаний, где остается более 99 процентов расщепляющихся материалов<sup>63</sup>, эта полость становится фактическим рудником дорогого ядерного топлива.

При изучении гипотезы о более раннем испытании крайне интересно было тщательно посмотреть на обнаружения в этом регионе за недели, следующие за 15 апреля 2010 года. Были найдены два интересных события. Начиная с 20 апреля 2010 года, в Такасаки наблюдался 36-часовой импульс ксенона-133 (рис. 6), а между 27 апреля 2010 года и 2 мая 2010 года была необычно долгая последовательность обнаружения цезия-137 на Окинаве. Все значения были близки к пределам обнаружения, но,

поскольку они наблюдались в последовательных образцах, они представляют явные сигнатуры. Импульс ксенона-133 в Такасаки был измерен в трех последовательных образцах. Анализ по программе WebGrave на рис. 6 показывает, что выброс ксенона-133 около 15 апреля 2010 года где-то в Северной Кореи вполне мог быть источником этих измерений ксенона-133 в Такасаки несколькими днями позже. Аналогично, импульс <sup>137</sup>Cs на Окинаве также мог быть связан с выбросом (в данном случае <sup>137</sup>Xe) в Северной Кореи в соответствующее время, но, поскольку <sup>137</sup>Cs периодически наблюдается в данном районе и расстояние до Окинавы составляет 1 600 км, он не представляет сильную поддержку гипотезы об испытании в середине апреля 2010 года. Если последовательность цезия была связана с таким испытанием в Северной Кореи, она могла бы быть результатом не полностью мгновенного выброса (поскольку не был обнаружен <sup>140</sup>Ba) <sup>137</sup>Xe с периодом полураспада 3,818 минуты.

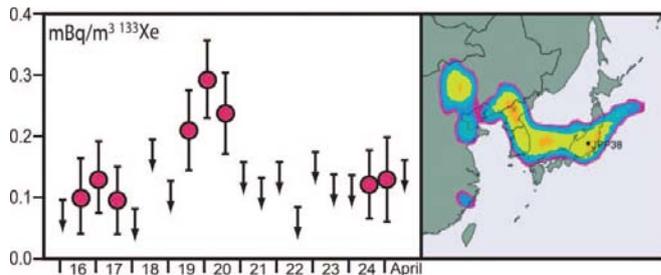


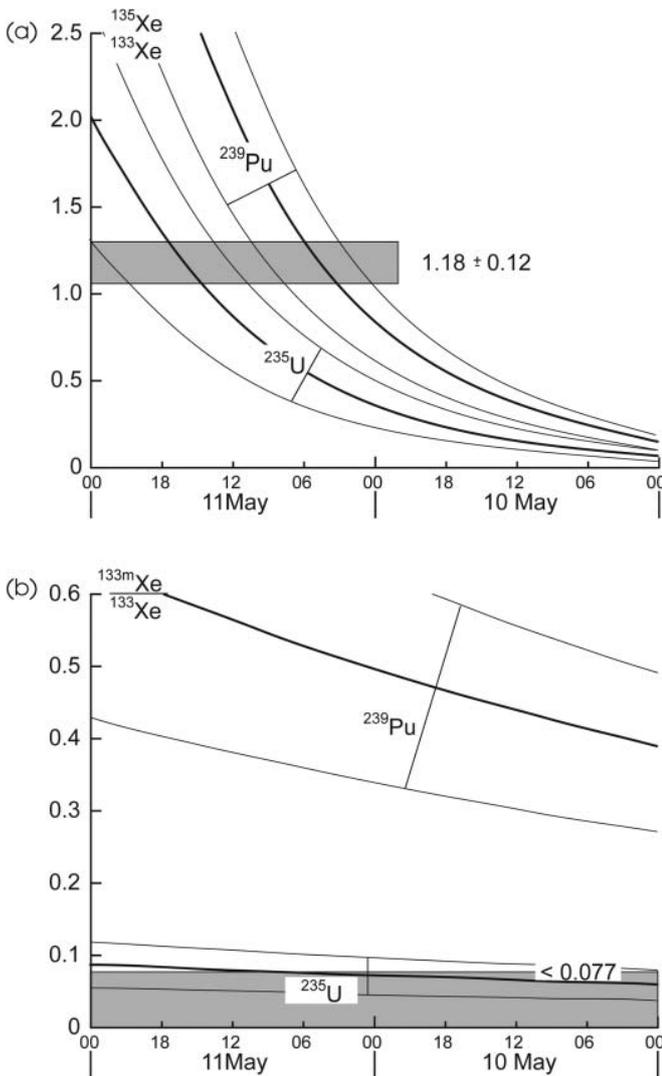
Рис. 6: Сигнал ксенона-133 в Такасаки в конце апреля 2010 года. Стрелки указывают верхние пределы. Карта показывает четырехдневное поле соответствия, относящееся к 20 апреля, которое показывает, что источник вполне мог быть выбросом в КНДР около 15 апреля 2010 года. Легенду цветовой шкалы смотрите на рис. 5 (цветной рисунок, доступный в сети Интернет).

#### Построение сценария, который соответствует всем наблюдениям

Конечно, невозможно с полной уверенностью описать все обстоятельства, которые могли бы создать наблюдавшиеся сигнатуры радионуклидов. Однако, вероятность того, что подземное ядерное испытание малой мощности было проведено 11 мая 2010 года, или, возможно, на день раньше, значительна. Базируясь на предположении, что все сигналы ксенона и его дочерних продуктов, обнаруженные в середине мая 2010 года, были результатом выброса от такого взрыва, приведенный выше анализ позволяет предположить, что было по крайней мере три выброса с площадки испытаний. Во-первых, обнаружения <sup>140</sup>Ba требуют мгновенного выброса; во-вторых, имеется свидетельство того, что ксенон-135, обнаруженный в Дзюдзьян, произошел от выброса "девственного" радиоактивного ксенона, задержанного на один или два дня, и, в-третьих, имеется свидетельство того, что сигнал в Такасаки был связан с "не девственным" радиоактивным ксеноном, выброшенным с площадки на следующий день, или около того. Большая часть этих предположений соответствует наблюдавшимся отношениям нуклидов в различные времена и метеорологическим картинам переноса радионуклидов в соответствующие точки регистрации в правильной временной последовательности.

Однако, имеется одно исключение: данные Дзюдзьян требуют, чтобы в соответствующем выбросе был посторонний источник ксенона-133. Невозможно найти разумный процесс, в котором газ, выбрасываемый в течение первого часа, который увеличил бы уровни ксенона-133 в атмосфере, воспроизвел бы полную наблюдаемую сигнатуру. Соответствие с сигнатурой может быть установлено, если только предположить, что ксенон-133 присутствовал в полости до взрыва 10 или 11 мая 2010 года. Наилучшее соответствие достигается, когда исходный подземный газ содержал в 45 раз больше старого, чем свежего ксенона-133. Более того, это соответствие также требует, чтобы расщепляющимся материалом был <sup>235</sup>U. Решения для плутония найти нельзя. На рис. 7 показаны

рассчитанные и наблюдавшиеся усредненные по сектору отношения активности  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  и  $^{133\text{m}}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$ , включающие соответствующие неопределенности. Такое доминирование старого ксенона может показаться удивительным, но причиной является очень высокое различие (почти в 10 000 раз) между совокупным (старым или "не девственным") и независимым ("девственным") выходами для  $^{235}\text{U}$ . По той же самой причине этот доминирующий вклад (по активности) старого  $^{133}\text{Xe}$  соответствует, для деления урана, не более, чем 0,5 процента, если его измерять в тоннах тротила, как в табл. 2. Для деления плутония эта доля составляет 6 процентов из-за в десять раз более высокого отношения независимого выхода к совокупному. Такая малая доля (в особенности для урана) старого ксенона вполне может быть зафиксирована в порах на поверхности скального грунта и в трещинах и расщелинах полости, и затем быть освобождена повторным взрывом. Другая возможность состоит в том, что два испытания проводились в двух прилегающих полостях, и стена между ними была разрушена вторым взрывом. Как показано на рис. 7, этот анализ показывает, что второй взрыв скорее произошел не 10, а 11 мая 2010 года.



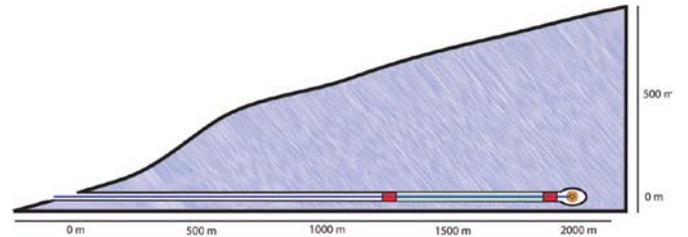
**Рис. 7:** Отношения усредненной по спектру активности, рассчитанные для образца в Дзюдзьяин в зависимости от времени события деления в диапазоне, определенном по данным по барии-140 и лантану-140 на Окинаве. Предполагается, что присутствует "девственный" ксенон и ксенон, "усиленный" в 45 раз от прошлого взрыва в той же самой полости. Серые прямоугольники представляют результаты измерений. Более тонкие линии представляют пределы неопределенности, приведенные в базе данных JEFF 3.1.1.

Тот факт, что анализ позволяет предположить, что расщепляющимся материалом был уран, является прав-

доподобной догадкой, потому что уран предпочтительно использовать в качестве расщепляющегося материала в ядерных экспериментах малой мощности для того, чтобы избежать влияния высокого паразитного нейтронного фона, связанного с плутонием. Для того, чтобы поддерживать взрывной выход критической сборки на низком уровне, начальное сжатие должно быть сравнительно медленным, что предполагает высокую чувствительность к паразитным нейтронам и риск того, что реакции деления начнутся слишком рано для успешного и хорошо контролируемого эксперимента<sup>64</sup>.

Так что *один* из возможных сценариев может быть следующим (см. графическое представление на рис. 8):

- В глубоком туннеле в Северной Корее, подобном туннелю в горе Мантап, была вырыта галерея, способная ослабить сейсмический сигнал от ядерного взрыва в 4 раза, или более. Этот туннель был закрыт по крайней мере двумя герметизирующими комплексами<sup>65</sup>, одним ближе к полости, и одним ближе к входу в туннель.



**Рис. 8:** Возможный сценарий испытания, который может удовлетворить всем наблюдениям радионуклидов, в длинном туннеле с умеренно расширенной полостью (или, возможно, с двумя прилегающими полостями) в конце, где проводились повторные испытания малой мощности. Красными прямоугольниками отмечены герметизирующие барьеры, а проходящая линия символизирует контрольные и диагностические кабели от пункта испытания до внешних систем. Немедленно после взрыва силы очень высокого давления проталкивают некоторую часть "девственных" инертных газов через герметизирующие барьеры, наиболее вероятно, через места прохождения кабелей. Газы, которые выходят таким образом, составляют первый выброс, который вскоре вызовет подъем бария-140, и "девственные" инертные газы и старый ксенон-133 накопятся в зеленом пространстве между герметизирующими барьерами. Этот газ будет позже выброшен, по крайней мере частично, когда это пространство будет сделано доступным для диагностических целей. Затем, когда по той же причине будет открыт внутренний герметизирующий барьер, появится возможность для третьего выброса, на этот раз "не девственных" инертных газов (цветной рисунок, доступный в сети Интернет).

- 15 апреля 2010 года, или около того, был произведен один испытательный ядерный взрыв с мощностью менее 200 тонн тротилового эквивалента. В некоторых отношениях испытание могло оказаться неудачным, и по этому не было никакого объявления об успехе в "День Солнца". Остаточные радионуклиды отложились в порах на поверхности полости, так же как в трещинах и расщелинах.
- 11 мая 2010 года было проведено второе ядерное испытание в той же самой, или в прилегающей, полости. Из-за первоначально очень высокого давления "девственные" и старые (остатки от эксперимента в середине апреля 2010 года) газы были мгновенно выдавлены из испытательной полости через два барьера, построенные во входном туннеле. Эта утечка вполне могла произойти через контрольные и сигнальные кабели от пункта испытания до входа в туннель, что является классической проблемой подземных испытаний. Конденсация должна была произойти довольно быстро, а фильтрация должна была быть достаточно эффективной, чтобы в образцах, в которых был обнаружен  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ , не было найдено никаких следов летучих радионуклидов йода или тел-

- луга.
- Газ, который прошел через оба барьера, позволил обнаружить  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$  на Окинаве и  $^{140}\text{La}$  в Уссурийске, но часть газа была также захвачена в объеме между двумя барьерами, когда начальное высокое давление уменьшилось.
  - Утром 12 мая 2010 года (KST) был окончательно объявлен успех эксперимента по ядерному синтезу.
  - 11 или 12 мая 2010 года персонал испытательного полигона открыл проход во внешнем барьере и смесь "девственных" и старых газов в объеме между двумя барьерами вышла в атмосферу. Возможно, смесь газов была сжата в испытательной трубке для того, чтобы перенести ее в лабораторию типа Йонбена для анализа и диагностики. Это создало возможность для того, чтобы смесь "девственного" и старого газа могла вытечь из лаборатории, а не из входа испытательного туннеля. Эти газы были снесены ветром в направлении Дзюдзьяин с испытательной площадки, из лаборатории, или из обеих мест. Все еще возможно, однако, что "девственные" газы, обнаруженные в Дзюдзьяин, были частью мгновенного выброса, что позволило бы упростить сценарий. Для лучшего понимания этого следует провести прямой метеорологический анализ от подозреваемых площадок.
  - 13 или 14 мая 2010 года был открыт проход во внутреннем барьере и в атмосферу был выброшен "не девственный" ксенон. Это облако было обнаружено в Такасаки.
  - Невозможно определить надежность сообщения в *Нодон Синмун*, которое предполагает, что были успешно достигнуты термоядерные реакции. В этом сообщении также говорится, что эксперименты были связаны с "разработкой новой энергии, которая нужна человечеству", которая далее характеризовалась как "...безопасная и дружелюбная к окружающей среде новая энергия, источник которой неисчерпаем". Но военный синтез является более простой проблемой, чем гражданский, и можно предположить, что сообщение на самом деле связано с некоторым успехом военного синтеза.
  - И, если серьезно воспринимать заявление Северной Кореи как военный успех, то имеются сценарии ядерного испытания с малой мощностью в диапазоне от 10 до 200 тонн в тротиловом эквиваленте, которые могут имитировать все обнаружения радионуклидов и которые могут привести к значительному количеству термоядерных реакций в объеме дейтериево-тритиевого газа или даже дейтерида лития, которые могут подтвердить успех<sup>66</sup>. Это, вероятно, было сделано времяпролетными измерениями, демонстрирующими присутствие нейтронов с энергией 14,1 МэВ в режиме "он-лайн". Однако, не существует никакого способа, чтобы определить синтез малого масштаба в ядерном испытании из дистанционных обнаружений выброшенных инертных газов.
  - Так же важно, что анализы указывают на то, что в ядерном испытании в мае 2010 года наиболее вероятно использовалось устройство, базирующееся на высокообогащенном уране, что проливает новый свет на возможности обогащения в Северной Корее, и (или) на возможные тайные соглашения о сотрудничестве с другими государствами с ядерными амбициями<sup>67</sup>. Раскрытие любых таких связей, возможно, было причиной, почему в ноябре 2010 года бывший директор Лос-Аламосской национальной лаборатории Зигфрид Хеккер был несколько загадочно приглашен осмотреть вновь построенную установку с центрифугами в Йонбене<sup>68</sup>.
  - 19 октября 2011 года представитель второстепенной Либерально-передовой партии Южной Кореи, цитируя официального военного представителя Северной Кореи, заявил, что КНДР с 2006 года эксплуатирует предприятие по обогащению урана на западном берегу, и что страна уже разрабатывает с 2007 года ядерное оружие с использованием обогащенного урана, переключившись со своей программы производства плутония<sup>69</sup>. Если это правда, то это проливает новый свет на визит Хеккера, и очевидно согласуется с обсуждающимися обнаружениями.
  - Сценарий испытания, рассматриваемый в этом Приложении, является спекулятивным, но он может объяснить все особенности нуклидов ксенона и его дочерних продуктов, обнаруженных в Южной Корее, Японии, и Российской Федерации в середине мая 2010 года и в конце апреля 2010 года. Этот сценарий включает два ядерных испытания, проведенных в одной и той же полости (или в двух прилегающих полостях), одно в середине апреля 2010 года и второе в первой половине мая 2010 года. Идея о взрыве в середине апреля поддерживается выбросом ксенона-133, который был обнаружен в Такасаки около 20 апреля, а также официальным заявлением правительства Северной Кореи. Этот анализ позволяет улучшить точность оценки даты второго взрыва, помещая ее на 11 мая 2010 года, и также позволяет предположить, что расщепляющимся материалом во взрыве 11 мая 2010 года был высокообогащенный уран. Поскольку не было никаких сейсмических обнаружений испытания, мощность хорошо связанных взрывов должна быть менее 50 тонн. Однако, можно оценить, что разумная развязка может поднять верхний предел до 200 тонн.

### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. В строгом соответствии с словарем у туннеля есть выход на каждом конце. Если есть только один выход, что обычно для ядерных испытаний в горизонтальной конфигурации, то правильнее будет использовать название "штольня". Поскольку разногласие не очень важно, мы будем использовать слово "туннель" в обоих случаях.
2. J. R. Murphy, B. C. Kohl, J. L. Stevens, T. J. Bennett, and H. G. Israelssohn, "Exploitation of the IMS and Other Data for a Comprehensive, Advanced Analysis of the North Korean Nuclear Tests," (paper presented at the 2010 Monitoring Research Review Orlando, Florida, 21–23 September 2010), <<https://na22.nnsa.doe.gov/mrrr/2010/PAPERS/04-11.PDF>>.
3. A. Ringbom, K. Elmgren, K. Lindh, J. Peterson, T. W. Bowyer, J. C. Hayes, J. I. McIntyre, M. Paninsko, and R. Williams, "Measurements of Radioxenon in Ground Level Air in South Korea Following the Claimed Nuclear Test in North Korea on October 9, 2006," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 282(2009): 773–779.
4. P. R. J. Saey, M. Bean, A. Becker, J. Coyne, R. d'Amours, L.-E. De Geer, R. Houge, 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, L20802 (2007).
5. См. ссылку [2].
6. North Korea Plans "Nuclear Test in Coal Mine," *Mining Top News*, <<http://www.miningtopnews.com/north-korea-plans-nuclear-test-in-coal-mine.html>>.
7. См. ссылку [2].
8. Такие усилия могут включать инвестиции в более совершенные герметизирующие устройства в туннеле, или бурение вертикальной шахты в конце туннеля, которая будет аккуратно запечатана после установки на ее дне испытываемого устройства.
9. L.-E. De Geer, "Sniffing out Clandestine Tests," *Nature*, 382(1996): 491–492 and C. R. Carrigan, R. A. Heinle, G. B. Hudson, J. J. Nitao, and J. J. Zucca, "Trace Gas Emissions on Geological Faults as Indicators of Underground Nuclear Testing," *Nature*, 382(1996): 528–531.
10. O. Dahlman, J. Mackby, S. Mykkeltveit, and H. Haak, *Detect and Deter: Can Countries Verify the Nuclear Test Ban* (Heidelberg: Springer, 2011).
11. Государства с ядерными возможностями определяют те государства, которые во время переговоров по ДВЗЯИ имели энергетические или исследовательские реакторы. На январь 2012 года остаются восемь идентифицированных государств с ядерными возможностями, которые еще не ратифицировали ДВЗЯИ; это Китай, Египет, Индия, Иран, Израиль, Северная Корея, Пакистан, и Соединенные Штаты.
12. Термин "в составе частиц" означает, что радионуклиды либо прикреплены к микроскопическим частицам, либо находятся внутри них. Если частицы взвешены в атмосфере, то их называют аэрозолями. Большая часть радионуклидов, образующихся в атмосферных ядерных

- взрывах, относится к этой форме. Они легко собираются при продувке воздуха через фильтр, и при анализе гамма-излучения от таких образцов можно достичь исключительно высокой чувствительности.
13. M. Matthews, J. Schulze, "The Radionuclide Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization: From Sample to Product," *KERNTECHNIK*, 66(2001): 102–120.
14. K. M. Matthews, and L.-E. De Geer, "Processing of Data From a Global Atmospheric Monitoring Network for CTBT Verification Purposes," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 263(2005): 235–240.
15. См. ссылку [10], стр. 63–64.
16. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), <<http://www.ctbto.org/>>.
17. САУНА - это аббревиатура от "Swedish Automatic Unit for Noble gas Acquisition" (Шведское автоматическое устройство для обнаружения инертных газов).
18. A. Ringbom, T. Larsson, A. Axelsson, K. Elmgren, and C. Johansson, "SAUNA—A System for Automatic Sampling, Processing and Analysis of Radioactive Xenon," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 508(2003): 542–553.
19. Тот факт, что сбор образцов здесь упоминается как производящийся при комнатной температуре, приводится потому, что в период проектирования это было весьма неортодоксальным подходом, который сильно упростил процесс.
20. В воздухе содержится 87 частей на миллиард стабильных изотопов ксенона.
21. Расстояния до испытательного полигона у горы Мантап соответственно лежат в диапазоне от 330 до 1660 км.
22. Период сбора образцов на станции Дзиодзяин был определен из времени, данного Ким Сон-доном и из графика анализов САУНА.
23. При необходимости это можно будет пересчитать для любого другого стандарта и это действительно сделано в тексте с данными станции Дзиодзяин для того, чтобы предоставить значения, которые можно более непосредственно сравнить с расчетами динамики массовой цепочки (по Бейтмену). В Уссурийске это реально был лантан-140, но, основываясь на примерном равновесии, наблюдавшемся на Окинаве, и предполагая общий источник для обнаружений на Окинаве и в Уссурийске, эти значения для лантана были пересчитаны на значения бария-140 для простоты сравнения. Все эти определенные значения бария-140 были ниже критерия обнаружения бария-140, что показывает, что лантан-140 обычно предоставляет самое чувствительное средство для обнаружения массовой цепочки 140.
24. "Radioactivity Detected after N. Korea Nuclear Fusion Claim," в *Chosun Ilbo*, крупной ежедневной газете в Южной Корее, 21 June 2010, <[http://english.chosun.com/site/data/html\\_dir/2010/06/21/2010062101166.html](http://english.chosun.com/site/data/html_dir/2010/06/21/2010062101166.html)>.
25. "Did NK Conduct a 3rd Nuclear Test in May?," в *The Korea Times*, ежедневной газете на английском языке в Южной Корее, <<http://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2010/10/11674808.html>>.
26. Evaluated Nuclear Structure Data File, ENSDF file, поддерживаемый National Nuclear Data Center (NNDC) в Брукхейвене, США, <<http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>>. За исключением выходов деления, все ядерные данные в этом отчете взяты из ENSDF.
27. Не следует путать со шведской установкой САУНА, которая была перевезена самолетом в Южную Корею в октябре 2006 года, которая обнаружила изотопы ксенона от первого ядерного испытания КНДР поблизости станции Дзиодзяин.
28. Веб-сайт Международного центра данных, <<http://www.ctbto.org/expert-area>>. Пользователи должны быть назначены Постоянной миссией государства-участника с аккредитованным Постоянным представителем (или Постоянным наблюдателем) Подготовительной комиссии Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.
29. См. ссылку [28].
30. Там же.
31. Малыми обнаруженными концентрациями  $^{131m}\text{Xe}$  пренебрегают, поскольку они являются типичными фоновыми значениями для этого сравнительно долгоживущего изотопа.
32. JEFF 3.1.1, Joint Evaluated Fission and Fusion File, Nuclear Energy Agency, получаемого через JANIS 3.2 по адресу <<http://www.oecd-nea.org/janis/>>. Все данные о выходе продуктов деления в этом отчете взяты из JEFF 3.1.1.
33. Эти испытания проводились 18 декабря 1966 года на советском испытательном полигоне в Семипалатинске и 23 марта 1971 года к северу от Перми в Советском Союзе. Последнее испытание проводилось для изучения возможности использования ядерных взрывов для поворота реки Печора на юг для ирригационных целей.
34. G. Persson, "Fractionation Phenomena in Activity from an Underground Nuclear Explosion," *Health Physics*, 16(1968): 515–523.
35. B. Eriksen, "Undersökningar av luftburet radioaktivt material härrörande från en underjordisk kärnladdningsexplosion i USSR den 23 mars 1971," (на шведском языке). "Исследование радионуклидов в воздухе от подземного ядерного взрыва в СССР 23 марта 1971 года." FOA 4 report C 4502-A1.
36. При энергии нейтронов деления не имеется существенных побочных реакций в двух изотопах ксенона, в отличие от ситуации при тепловых энергиях, где поперечные сечения захвата ксеноном очень высоки, в особенности для ксенона-135.
37. Используя данные из рис. 2, отношение активности  $^{135}\text{Xe}/^{133}\text{Xe}$  может быть оценено как  $[0.0842/0.000707] * [5.243 * 24 / 9.14] = 1640$ .
38. T. P. McLaughlin, S. P. Monahan, N. L. Pruvost, V. V. Frolov, B. G. Ryazanov, and V. I. A. Sviridov, "A Review of Criticality Accidents, 2000 Revision," *Los Alamos Report*, LA-13638, May 2000.
39. T. Kværna, F. Ringdal, and U. Baadshaug, "North Korea's Nuclear Test: The Capability for Seismic Monitoring of the North Korean Test Site," *Seismological Research Letters*, 78(2007): 487–497 и T. Kværna, частное сообщение, 18 февраля 2011 года.
40. H. Bateman, "The Solution of a System of Differential Equations Occurring in the Theory of Radioactive Transformations," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 15(1910): 423–427.
41. Фильтр частиц ДВЗЯИ номинально собирает частицы в течение 24 часов, ожидает 24 часа, и считает 24 часа. Формальные требования допускают, однако, 10% отклонения от этих периодов, до тех пор, пока их сумма не превышает 72 часов. Это делается для того, чтобы предоставить время на процедуры аутентификации, проверку измерений источника, и на другие местные нужды. 15 мая 2010 года время счета фильтра на станции Окинава было на 22 минуты короче 24 часов.
42. R. Plenteda, "A Monte Carlo Based Virtual Gamma Spectroscopy Laboratory," Ph.D. Thesis, Institute of Atomic and Subatomic Physics, Vienna, Austria (2004) and L.-E. De Geer and R. Plenteda, "VGSL, The Virtual Gamma Spectroscopy Laboratory," Presentation at the International Committee for Radionuclide Metrology (ICRM) gamma spectroscopy working group meeting at Laboratoire National d'Essais (LNE), Paris, France, April 2009.
43. k - это фактор покрытия, используемый в современных оценках неопределенности. k = 1 соответствует старому обозначению ± одна сигма ( $\sigma$ ).
44. UTC - это всеобщее скоординированное время, и оно используется во всей этой статье, если только не указано иное. В некоторых случаях используется местное время, KST или корейское стандартное время, где KST = UTC + 9 часов. Ни в UTC, ни в KST не применяется переход на летнее время.
45. L. A. Currie, "Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination—Application to Radiochemistry," *Analytical Chemistry*, 40(1968): 586–593.
46. L.-E. De Geer, "Currie Detection Limits in Gamma-ray Spectroscopy," *Applied Radiation and Isotopes*, 61(2004): 151–160.
47. L.-E. De Geer, "Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty: Relevant Radionuclides," *KERNTECHNIK*, 66(2001): 113–120.
48. Десять из шестнадцати предписанных лабораторий ДВЗЯИ в настоящее время сертифицированы и работают.

49. Слово "девственный" здесь используется как относящееся к части продуктов деления, которая образуется непосредственно в процессе деления. Она соответствует концепции независимого выхода деления на рис. 2. Термин "не девственный" соответственно используется для указания части, которая получается при распаде предшественников.
50. A. Becker, G. Wotawa, and L.-E. De Geer, "Review of New PTS Modelling Capabilities Supporting the Emerging CTBTO-WMO Response System Including a Proposal for Standardized Model Intercomparison," World Meteorological Organization (WMO), WWW, CBS(ERA-CG(INF.1(Doc.8.3 (8.III.2004)).
51. Больше информации о не отождествленном подземном сооружении Хагап в горах Миоян можно найти на <<http://www.globalsecurity.org/wmd/world/dprk/myohyangimgery.htm>>.
52. Усредненная по спектру активность базируется на площади пика в спектре, поделенной на коэффициент ветвления, эффективность и реальное время счета.
53. L.-E. De Geer, "The Xenon NCC Method Revisited," FOI, Swedish Defence Research Agency report, FOI-R-2350-SE (2007).
54. См. ссылку [26].
55. См. ссылку [32].
56. "Время обрезания предшественника" - это время, когда радиоактивные изотопы ксенона отделяются от всех своих предшественников, так что в отделенном объеме больше не будет происходить образования радиоактивного ксенона от распада иода.
57. Korean News Service, News from the Korean Central News Agency of DPRK, Pyongyang, "DPRK Succeeds in Nuclear Fusion," 12 May 2010, <<http://www.kcna.co.jp/indexe.htm>>.
58. Общевыходной день празднования дня рождения покойного основателя КНДР Ким Ир Сена, родившегося 15 апреля 1912 года. Интересно отметить, что 15 апреля 2012 года приходится на его сотый день рождения.
59. A. A. Spivak, "Methods of Evading Detection by a Nuclear Explosion Monitoring Network under Special Conditions," In *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*, E. S. Husebye, and A. M. Dainty, Eds. (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996).
60. W. Leith, "Geologic and Engineering Constraints on the Feasibility of Clandestine Nuclear Testing by Decoupling in Large Underground Cavities," U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Open File Report 01-28, 2001.
61. D. King, B. Freeman, D. Eilers, and J. Johnson, "The Effective Yield of a Nuclear Explosion in a Small Cavity in Geologic Material: Enhanced Coupling Revisited," *Journal of Geophysical Research*, 94(1989): 12375-12385.
62. См. ссылку [60].
63. T.B. Cochran and C.E. Paine, "The Amount of Plutonium and Highly-Enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons," in *Nuclear Weapons Databook* (New York: Natural Resources Defense Council, 1995). Согласно Кохрену и Пейну, страна со средними техническими возможностями может изготовить бомбу деления в 1 кт из примерно 1,5 кг плутония, или 4 кг высокообогащенного урана (ВОУ), содержащих соответственно 30 и 80 кт потенциальной энергии деления. Следовательно, 200-тонная плутониевая или урановая бомба потребляет менее одного процента топлива.
64. Это аналогично тому, почему плутоний непригоден для ядерной боеголовки оружейного типа, и почему для использования плутония была изобретена схема имплозии с более быстрой последовательностью ускорения до критичности, который также является более подходящим для оружия материалом из-за его значительно меньшей критической массы.
65. V. N. Mikhailov, Y. V. Dubasov, and A. M. Matushenko, "Nuclear Explosions in the USSR: The North Test Site," Interagency Expert Commission on assessment of radiation and seismic safety of underground nuclear tests, Scientific-Industrial Association, V. G. Khlopin Radiation Institute Report, St Petersburg, 1999.
66. Если принимать буквально сообщение *Rodong Sinmun*, то испытание могло быть разработано для вовлечения термоядерных процессов. Существуют некоторые сценарии ядерных испытаний малой мощности в диапазоне от 10 до 200 т тротилового эквивалента, которые могут воспроизвести все наблюдения радионуклидов и которые могут инициировать существенное количество термоядерных реакций в объеме дейтериево-тритиевого газа. Нижний предел взят из авторитетного отчета Национальной академии наук США, в котором указывается, что "частичная разработка первичных компонентов для термоядерного оружия" может быть проведена в диапазоне от 0,01 до 2 кт (*Technical Issues Related to the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty* [Washington, DC: National Academy Press, 2002]). Верхний предел устанавливается возможностями обнаружения ДВЗЯИ и других сейсмических сетей в регионе для умеренно развязанного взрыва и тем фактом, что ничего подозрительного не было обнаружено. Испытания в нижней части этого диапазона предположительно улучшат понимание механизма радиационной имплозии в современных термоядерных зарядах с использованием миниатюрных вторичных компонентов, и "верификация частичного выхода... оружия с термоядерным усилением" может, как сообщают, быть сделана в верхней части диапазона (T. B. Cochran and C. E. Paine, *The Role of Hydronuclear Tests and Other Low-Yield Nuclear Explosions and Their Status Under A Comprehensive Test Ban* [Washington, DC: National Resources Defense Council, 1995]).
67. S. Tisdall, "China Pressed over Iran and North Korea's Nuclear Trade," *The Guardian*, <<http://www.guardian.co.uk/world/2010/nov/28/china-iran-north-koreanuclear>>, 28 Nov. 2010.
68. S. S. Hecker, "A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex," CISC Stanford University Report, 20 Nov. 2010 and S. S. Hecker, "What I Found in North Korea—Pyongyang's Plutonium Is No Longer the Only Problem," *Foreign Affairs*, 9 Dec. 2010.
69. Kim Eun-jung, "N. Korea Operating Second Uranium Enrichment Facility: Lawmaker," Yonhap News Agency, 19 October 2011, <<http://english.yonhapnews.co.kr/national/2011/10/19/18/0301000000AEN20111019008600315F.HTML>>.