

## ПРОГРЕСС МОНИТОРИНГА ДОГОВОРА О ВСЕОБЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ С МОМЕНТА ОТКЛОНЕНИЯ ЕГО РАТИФИКАЦИИ СЕНАТОМ США В 1999 ГОДУ

*Дэвид Хефмейстер*

Изучается прогресс контроля над выполнением (мониторинга) Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), начиная с исследования национальной академии наук (НАН) США, за которым последовали последние открытия по региональной сейсмологии, по контролю с помощью антенных решеток, корреляционному детектированию, сейсмическому моделированию и несейсмическим технологиям. Исследование НАН-ДВЗЯИ пришло к выводу, что полностью сформированная система международного мониторинга (СММ) сможет надежно обнаружить и отождествить ядерные взрывы с порогом 0.1 кт в твердых скалах, если эти взрывы проведены в любом месте Европы, Азии, Северной Америки и Северной Африки. Для некоторых мест взрывов порог составляет 0.01 кт или ниже, но при этом возрастает число фоновых явлений.

В качестве примера указывается ядерное испытание в Северной Корее 9 октября 2006 года с мощностью 0.6 кт, которое было сразу же обнаружено сейсмометрами в Австралии, Европе, Северной Америке и Азии. Соотношение амплитуд Р- и S-волн в частотном диапазоне 1-15 Гц четко указало, что это событие было взрывом, а не землетрясением. Приведенные в этой статье примеры успехов в сейсмическом мониторинге подкрепляют выводы исследования НАН. Интерферометрический радар с синтезированной апертурой (ИРСА) способен в ряде случаев отождествить и определить положение килотонного испытания на глубине 500 м по измерению понижения уровня почвы до 2-5 мм. ИРСА может отличить землетрясения от взрывов по форме таких понижений. ИРСА не обеспечивает быстрого реагирования, но может определить положение места ядерного испытания с точностью до 100 м, что достаточно для проведения инспекции на месте. При совместном мониторинге можно обнаруживать взрывы с мощностью до 10 кг рядом с испытательным полигоном и с мощностью ниже граммов на расстоянии двух метров от места проведения эксперимента без раскрытия ядерных секретов.

Д. Хефмейстер работает в Центре международной безопасности и сотрудничества, Стенфордский университет, Калифорния, США

Статья получена редакцией 5 февраля 2007 года и принята к опубликованию 29 июля 2007 года.

Автор высоко оценивает обсуждение со многими коллегами – это Г.Басс, Дж.Банн, Т.Бойер, П.Горден, С.Дрелл, Л.Франклин, Н.Галлахер, Дж.Гудби, Р.Хагенгрубер, Дж.Харви, У.Хоккинс, С.Хеккер, Р.Джинлос, М.Мэй, У.Муни, Т.Лэй, Дж.Мэрфи, В.Пановский, Г.Паттон, П.Ричардс, Л.Сайкс, С.Тэйлор, П.Винсент, К.Уолкер, П.Уайт и Д.Уилкенинг.

Почтовый адрес для корреспонденций: Center for International Security and Cooperation, Encina Hall, Stanford University, Stanford, CA 94305-6165, USA. Адрес электронной почты: [dhafemei@calpoly.edu](mailto:dhafemei@calpoly.edu)

### ВВЕДЕНИЕ

Договор о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) запрещает все ядерные взрывы (включая мирные ядерные взрывы) любой мощности в любых местах и на все времена. Соединенные Штаты подписали ДВЗЯИ в 1996 году, но Сенат США отказал в «совете и согласии» для ратификации ДВЗЯИ в 1999 году. Одним из факторов в ходе сенатских обсуждений было опасение по поводу того, насколько хорошо будет контролироваться соблюдение договора. Данная статья обсуждает прогресс технологий мониторинга за период после отказа Сената от ратификации ДВЗЯИ в 1999 году. Эти результаты будут использованы в следующей статье автора<sup>1</sup> для определения того, является ли ДВЗЯИ *эффективно про-*

веряемым.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВЗЯИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК США В 2002 ГОДУ

В 2002 году НАН рассмотрела возможности Международной системы мониторинга (МСМ) в рамках ДВЗЯИ, предназначенной для контролирования сейсмических, инфразвуковых, гидроакустических и радиоактивных (радиоактивные ядра) сигналов<sup>2,3</sup>. Обнаружение сейсмических сигналов является наиболее важным, но и другие данные обеспечивают важные вклады.

### Улучшения сейсмического мониторинга

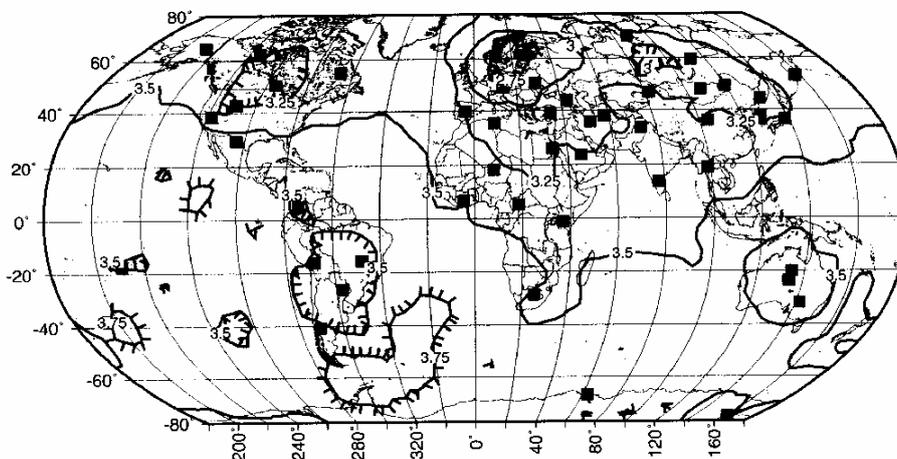
Сейсмические сигналы группируются в *телесеismicкие* волны и *региональные* волны в зависимости от расстояния до места регистрации. Телесеismicкие волны распространяются как *объемные* волны через внутренние части Земли – через земную кору в мантию и обратно в кору – на расстояния свыше 2000 км с более высокой частотой (0.2-3 Гц) или как низкочастотные (0.05 Гц) *поверхностные* волны. Амплитуды телесеismicких волн не сильно уменьшаются на расстояниях 2000-9000 км, что делает их удобными для измерения событий, лежащих за пределами границ страны. Продольные Р-волны (волны давления) легко возбуждаются взрывами и появляются первыми. Поперечные S-волны (сдвиговые волны) легко возбуждаются землетрясениями и появляются после Р-волн. Результаты НАН основаны на возможности контролировать как телесеismicкие, так и региональные волны на более близких расстояниях.

Сейсмическая магнитуда  $m_b$  определяется по начальной амплитуде волн давления с частотой 1 Гц, которые используются для оценки мощности взрыва в килотоннах (кт). В первом приближении, взрыв мощностью 1 кт, произведенный внутри твердой породы, имеет магнитуду около 4 на полигоне в Неваде. Геологические слои по-разному поглощают сейсмические волны и поэтому необходимы *коррекции ошибок* для каждого испытательного полигона при конвертировании магнитуды в мощность взрыва<sup>4</sup>. Прогресс сейсмологии снизил порог проблемных событий со значений магнитуды 4.3-5.6 тридцать лет тому назад до 2.0-3.5 сегодня, что понижает соответствующие мощности более, чем в сто раз<sup>5</sup>. С появлением высококачественных широкополосных сейсмометров и увеличением числа сейсмических станций сейсмические исследования сейчас сосредоточены на региональных сейсмических волнах, которые движутся по поверхности и по земной коре. Успехи в региональной сейсмологии, обсуждаемые более детально в дальнейших разделах, убедили рабочую группу НАН понизить пороговый уровень детектирования для МСМ от 1 кт до 0.1 кт, что явно усиливает контроль за ДВЗЯИ. Меньшие значения магнитуды событий подразумевают меньшие мощности взрывов, которые менее значительны с военной точки зрения.

Понижение порога ведет за собой возрастание фоновых событий – от 7000 землетрясений в год с магнитудой 4 и больше до 60 000 в год с магнитудой более 3. Используются некоторые критерии для отличия взрывов от землетрясений. Один из них связан с тем, что большинство событий могут быть отброшены, потому что они произошли под океанами или на большой глубине. Могут помочь дискриминации соотношения между Р- и S- волнами, а также другие соображения, как обсуждается в разделе «Мониторинг региональной сейсмологии».

Выводы НАН-ДВЗЯИ основаны на завершенной международной системе мониторинга, к которой призывал ДВЗЯИ. Планы деятельности МСМ и ее современный статус более детально обсуждаются в разделе «Международная система мониторинга». Если подвести итоги, то МСМ будет состоять из 321 контролирующих станций с датчиками для сейсмологии (50 основных и 120 вспомогательных), гидроакустики (11), радиоактивных ядер (80) и инфразвука (60), а также 16 получивших подтверждение лабораторий. Сейсмические станции МСМ используют широкополосные датчики, регистрирующие как телесеismicкие объемные волны на низких частотах, так и региональные волны на более высоких частотах, что повышает возможность проводить спектральные сравнения для улучшения дискриминации источника. Имеются цифровые записывающие устройства движения в трех направлениях (вверх/вниз, на север/юг, на восток/запад). Из 50 основных станций МСМ в 19 будут использоваться трехосные датчики, а в 30 – решетки датчиков со свободой вертикального переме-

щения. Решетки содержат от 9 до 25 датчиков на площади в несколько км<sup>2</sup>. Оценки порога сети зависят от локального сейсмического уровня, типа и качества датчика, от магнитуды и типа сейсмических волн, и от возможности использовать характеристики форм волн для дискриминации между ядерными взрывами, землетрясениями и обычными химическими взрывами.



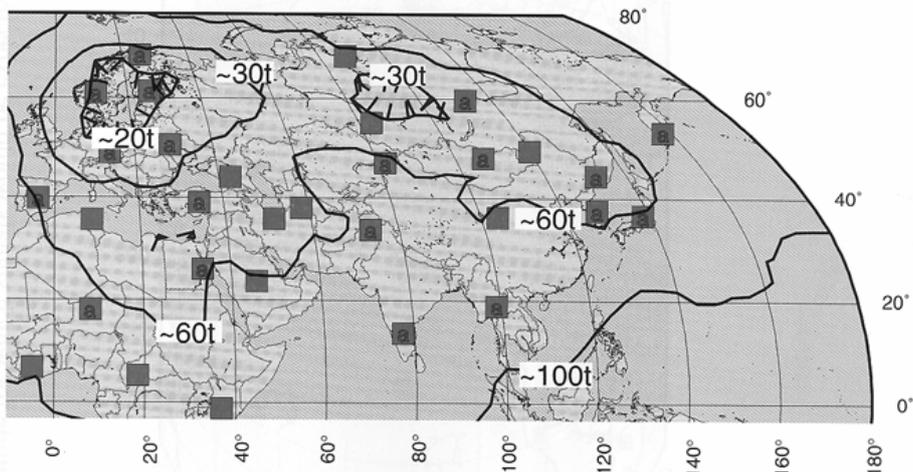
**Рис.1:** Пороги детектирования МСМ в сейсмических единицах ( $m_b$ ). Приведены контуры сейсмической магнитуды ожидаемой величины сигнала (с отношением сигнала к шуму выше, чем 3.2, т.е. порядка 10 дБ) на трех или более станциях, входящих в сейсмическую сеть МСМ (затемненные квадраты). Указанную на контуре магнитуду могут иметь 90% событий. Интервалы между контурами составляют 0.25  $m_b$ . (Данные Центра изучения мониторинга при Министерстве обороны США, приведенные в докладе НАН «Технические вопросы, связанные с ДВЗЯИ», Из-во НАН, 2002, стр.52)

Контуры сейсмического порога детектирования из доклада рабочей группы НАН-ДВЗЯИ с отношением сигнал/шум свыше 3.2 (что соответствует 10 дБ) тремя или более основными станциями МСМ (затемненные квадраты) приведены на Рис.1. МСМ должна обнаружить 90 % событий (это соответствует *высокой степени достоверности* по определению разведывательного сообщества) указанной магнитуды на границах контура. Порог детектирования НАН-ДВЗЯИ сетью основных станций в Европе, Азии, Северной Африке и Северной Америке находится между 3 и 3.5  $m_b$ . Порог меньше в тех местах, где станции решеток и сейсмографы установлены ближе друг к другу. Пороги детектирования станут ниже при дальнейших исследованиях региональных волн с добавлением новых технических возможностей, упомянутых в этой статье.

Контуры магнитуд из Рис.1 переведены в контуры мощностей взрывов на Рис.2 в соответствии с докладом НАН (стр. 41): 3.5  $m_b$  (0.1 кт), 3.25 (0.06 кт), 3 (0.03 кт), 2.75 (0.02 кт), 2.5 (0.01 кт), 2 (0.003 кт)<sup>6</sup>. Для большей части Евразии и Северной Африке это соответствует мощности 0.03-0.1 кт для взрыва, где взрывное устройство находится в тесном контакте с твердой породой. На контурах указаны тонны и подразумевается 90 %-ная вероятность детектирования, по меньшей мере, тремя станциями из основной сети в 50 станций. С использованием сейсмических решеток порог обнаружения взрывов на бывшем советском полигоне Новая Земля лежит между 2.0 и 2.5  $m_b$ , что соответствует мощности взрыва 0.003 – 0.01 кт. Эти результаты совместимы с другими оценками<sup>7-13</sup>.

### Выводы рабочей группы НАН

Рабочая группа НАН исходила из допущения, что все элементы МСМ развернуты и поддерживаются на уровне максимальной возможности:



**Рис.2:** Пороги детектирования МСМ, переведенные в мощность взрывов (кт). Приведены приблизительные мощности в тоннах (для взрывов в твердых породах), которые могут быть обнаружены на трех основных станциях МСМ (затемненные квадраты). Эти контуры определены на основе приведенных на Рис.1 контуров для магнитуд, но с увеличенным представлением Европы, Азии и Северной Африки (По данным Центра изучения мониторинга при МО США).

- Подземные взрывы могут быть обнаружены и отождествлены с взрывами на основе данных МСМ вплоть до уровня мощности 0.1 кт (в плотной среде), если они проведены в любом месте Европы, Азии, Северной Америки и Северной Африки. Для ряда представляющих интерес мест (например, Новая Земля) возможности доходят до 0.01 кт или даже ниже. В зависимости от среды, где произошел отождествленный взрыв, фактическая мощность может оказаться в диапазоне значений, на порядок величины больших или меньших измеренной, где верхний предел связан с испытанием в глубоких сухих и неплотных породах (очень слабая связь), а нижний – с испытанием в насыщенной влагой среде (очень хорошая связь). Положительное отождествление с ядерным взрывом при мощности менее нескольких кт может потребовать инспекцию на месте, если не наблюдается выброс радионуклидов. Похоже, что природа взрыва будет определена однозначно.
- Атмосферные взрывы могут быть обнаружены и отождествлены как ядерные на основе данных МСМ с большой уверенностью для мощности свыше 0.5 кт над континентами в северном полушарии и свыше 1 кт над остальной частью Земли и по-видимому при гораздо меньшей мощности для многих меньших регионов. Хотя определение природы взрыва может быть затруднительным на основе одних только данных МСМ, оценки другой информации (включая то, что получено национальными техническими средствами – НТС) могут обеспечить бесспорный результат.
- Подводные взрывы в океане могут быть легко обнаружены и отождествлены на основе данных МСМ при мощностях до 0.001 кт или даже при более низких. Положительное отождествление ядерного взрыва может потребовать сбора остатков. Определение природы взрыва может быть затруднено, если не станет доступной дополнительная информация, возможно, от НТС.
- Взрывы в верхней атмосфере и ближайшем космическом пространстве могут быть обнаружены и отождествлены с ядерными при помощи подходящих приборов с большой степенью достоверности для взрывов с мощностью выше кт, проведенных на расстояниях до примерно 100 миллионов км от Земли. (Эта возможность основана на допущении, что соответствующие приборы, которые предложено разместить на последующих системах для спутников DSP, будут действительно финансироваться и устанавливаться.)
- Взрывы при полном отсутствии связи с окружающей средой, превышающие по мощности 1-2 кт, нельзя надежно спрятать в полости, что сильно затруднит такие попытки. (Это будет полнее рассмотрено в текущей статье об *эффективной верификации*<sup>1</sup>.)

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА

Последняя Конференция по облегчению вступления в силу ДВЗЯИ состоялась в Вене 17-18 сентября 2007 года. Из 177 стран, подписавших к этому сроку ДВЗЯИ, 110 прислали делегации (среди них были Иран, Ирак и Пакистан), причем некоторые страны были представлены министрами или их заместителями. По состоянию на конец 2006 года прошли сертификацию 184 станции МСМ (из 321), 60 станций работали, но еще не прошли сертификацию, 19 находились на стадии постройки, 21 станция находились в состоянии переговоров и по 37 еще не была начата работа (смотрите Табл.1). Кроме того были сертифицированы 9 из 16 лабораторий радионуклидов. Разумно предположить, что последние 10 % станций не пройдут сертификацию в течении примерно 10 лет из-за трудной политической или географической ситуации, так что МСМ будет завершена на 90 % , может быть, к 2010 году.

**Таблица 1:** Статус программы размещения станций МСМ по состоянию на 31 декабря 2006 года

Тип станции МСМ	Размещение завершено		Строятся	Переговоры о контракте	Не начаты
	Сертифицированы	Нет			
Сейсмическая (основная)	36 (72%)	6	2	2	4
Сейсмическая (вспомогательная)	61 (51%)	38	2	9	10
Гидроакустическая	9 (82%)	1	1	0	0
Инфразвуковая	37 (62%)	1	4	6	12
Радионуклидная	41 (51%)	14	10	4	11
Всего	184	60	19	21	37

### Международный центр данных

Неотсортированные события сначала помещаются в Страницы стандартных событий 0,1,2 и 3 через 0,3, 2, 6 и 12 часов, соответственно. Автоматическая Страница стандартных событий 3 ежедневно получала в среднем 122 события в 2006 году, из которых 76 помещаются в Бюллетень просмотренных событий. События, где зафиксированы волновые данные (сейсмические, гидроакустические, инфразвуковые) помещаются в Бюллетень просмотренных и стандартных событий через день, а в Бюллетень отобранных стандартных событий через 2 дня. Время ожидания в Бюллетене просмотренных событий составляет 8 дней, что превышает намеченный трехдневный срок. Для улучшения ситуации математическое обеспечение компьютеров заменяется и на это уходит 2-4 миллионов долларов ежегодно. Время движения радиоактивных ядер составляет 1-2 недели.

### Связь

Международный центр данных (МЦД) отправил в 2006 году 1 600 000 наборов данных 808 пользователям в 94 странах со средней скоростью 8 гигабайт/день. Проверки работы оценивали надежность и безопасность сети МСМ и глобальной коммуникационной инфраструктуры (ГКИ), соединяющей станции МСМ с МЦД. Основные причины проблем на станциях с волновыми сигналами были математическое обеспечение (сейчас на это обращено внимание), силовое питание, выносные компьютеры, устройства ввода информации в компьютер и опознавание данных. ГКИ посылала 8.3 гигабайт/день в 2006 году, из которых доступно 99.6 % (97.9 % с запланированными перерывами), причем по контракту предусмотрено 99.5 %. По состоянию на декабрь 2006 года имелось 208 спутниковых терминалов с очень малой апертурой (84 % от запланированных 248) и просмотрено 240 центров связи (97 %). Временный технический секретариат (ВТС) использует системы управления качеством (СУК) для оценки планирования, мониторинга, анализа данных и операций.

### Указания на опасность

США потеряли свои права на голосование в Подготовительной комиссии Организации ДВЗЯИ. В соответствии с резолюцией, установившей создание Подготовительной комиссии (1996 год), « страна, подписавшая Договор, но не выполнившая полностью свои финансовые обязательства в течение 365 дней», не будет иметь голоса в Комиссии. По состоянию на 5 октября 2007 года США задолжали 24 миллиона долларов. Частично это вызвано тем, что США не будут финансировать деятельность, связанную с инспекциями на месте, потому что они не хотели вступления ДВЗЯИ в силу. Но последствия серьезнее, чем этот вопрос, который инициирован теми, кто хотел бы покончить с ДВЗФИ. В 2006 финансовом году США заплатили 14.4 миллиона долларов из затребованных 22 миллионов долларов, а в 2007 финансовом году – всего 10.5 миллионов долларов из 23.4 миллионов долларов, что вызывает раздражение в разные годы. На 2008 финансовый год администрация президента внесла в бюджет 18 миллионов долларов вместо требуемых 23.4 миллионов и сейчас вопрос рассматривается в Конгрессе. Поскольку на долю США приходится крупнейшие взносы в Организацию ДВЗЯИ, такие провалы с выплатами имеют важные неблагоприятные последствия для ОДВЗЯИ, имеющей на 2007 финансовый год бюджет в 110 миллионов долларов. Среди должников оказались Бразилия (12 миллионов), Аргентина (6.6 миллионов) и ряд других стран, а всего полные долги равны 51 миллионов долларов.

В Организации ДВЗЯИ работает 254 штатных сотрудников (286 вакансий), включая 163 профессиональных сотрудников (185 вакансий) из 60 стран. Примерно 45 лиц из числа профессиональных сотрудников являются гражданами пяти стран, имеющих ядерное оружие. ОДВЗЯИ придает отделу МСМ прикладной характер, поручив МЦД осуществлять руководство МСМ и анализировать данные МСМ. Поскольку работы МСМ обеспечены персоналом, начинают возникать планы технологии нового поколения, но они еще не обеспечены финансированием. Сроки контрактов профессиональных сотрудников ограничены семью годами, что усложняет деятельность МСМ и МЦД, поскольку приходится заменять талантливых сотрудников.

### Эксплуатация системы

Испытания эксплуатации системы (ИЭС) «оценивают возможности имеющихся функциональных элементов, включая процессы, помогающие достижению поставленных целей, например, доступность информации и требования к качеству, обработке данных, а также предоставлению услуг». Результаты ИЭС (декабрь 2005 года с 163 станциями, прошедшими сертификацию, и 32 ведущими сейсмическими станциями) показали, что МСМ в целом выполняет свои задачи за исключением того, что порог незавершенной основной сети на 0.3  $m_b$  выше конечной цели в южной части Южной Америки, Восточной Азии и Австралии<sup>14</sup>. Оценки указали, что необходимы дальнейшие средства для следующих вопросов: (1) зафиксировать и анализировать проблемы, (2) отслеживать и анализировать операционный статус, (3) разрабатывать оценки затрат на эксплуатацию и (4) измерять эксплуатационные качества МСМ.

### Критерии отбора

МЦВ использует критерии отбора, приведенные ниже, для распределения событий по разделам своих бюллетеней. В Протоколе ДВЗЯИ предлагаются дополнительные подходы, которые можно использовать после проведения дальнейших исследований<sup>15</sup>. Параллельный подход используется Центром данных США на базе ВВС Патрик во Флориде, который действует под руководством Центра технических приложений ВВС. Обученный военный персонал фильтрует данные, используя критерии, похожие на те, которые применяются в МЦД. Неопределенности, окружающие возможные проблемные события, отнимают значительные усилия, включая привлечение экспертов со стороны.

*Пороги  $m_b$* . Порог 3.0-3.3 применяется в МЦД в настоящее время, но он может быть снижен на основе анализа и улучшения оборудования. Понижение порога приводит к росту ошибочных положительных сигналов, поскольку протекает 60000 землетрясений в год с  $m_b$  свыше 3, а при  $m_b$  выше 4 это количество снижается до 7000 в год.

$(m_b - M_s) > 1$ . Взрывы возбуждают более сильные Р-волны ( $m_b$ ), чем поверхностные волны ( $M_s$ ) по сравнению с землетрясениями той же магнитуды. Величину  $M_s$  часто не удается

измерить для небольших взрывов, что требует региональных сейсмических данных для дискриминации между механизмами источников. Заново прокалиброванные величины магнитуды проверяются для событий ниже 3.5  $m_b$ <sup>16</sup>

*Место.* Семьдесят процентов обнаруженных сейсмических явлений происходят в океанах, что отбрасывает их из числа ядерных взрывов, если только не присутствует специфический гидроакустический сигнал с характеристиками взрыва. Но события, обнаруженные рядом с бывшими ядерными испытательными полигонами, изучаются гораздо более тщательно. Неопределенности с местом обнаружения с площадью 1000 км<sup>2</sup> (радиус 18 км) могут быть затруднительными получить для небольших событий при обнаружении ограниченным количеством контролирующих станций. Впрочем, ошибки определения места события резко уменьшаются при добавлении сейсмических станций, корреляционного анализа, интерферометрических радаров с синтезированной апертурой и трехмерных моделей<sup>17</sup>.

*Глубина более 10 км.* События, которые с уверенностью произошли на глубине свыше 5 км, должны быть исключены, но это требование облегчается исключением событий, зафиксированных на глубине свыше 10 км.

### **Совместное использование сейсмических данных**

Сейсмический мониторинг достиг больших размеров и продолжает расти. Глобальная сейсмическая сеть (ГСС) имела к октябрю 2007 года 143 сейсмические станции (из них 134 работали с телеметрией в реальном времени), что превзошло ее цель в 128 станций, и продолжала расти. Помимо сетей ГСС и МСМ существуют тысячи сейсмометров<sup>18</sup>. Станции, не входящие в МСМ, предоставили отличные сведения об испытаниях в Индии и Пакистане в 1998 году, а также об испытании в Северной Корее (2006 год). Большое количество сейсмографов улучшает возможности региональных данных. Объединенный исследовательский институт сейсмологии (IRIS) образовал ГСС в 1986 году, чтобы обойти устаревшую, аналоговую Всемирную стандартизованную сейсмографическую сеть. Все станции ГСС работают с цифровыми данными, к которым имеется свободный доступ в Интернете в почти реальном времени, а также из хранящегося в памяти архива Системы управления данными IRIS ([www.iris.edu](http://www.iris.edu))<sup>19</sup>. Широкополосные станции ГСС способны обнаружить очень слабые события, такие как нано-землетрясения вблизи Гавайев со значением  $m_b$  ниже нуля. Доступ с набором по телефону был заменен возможностью связи почти в реальном времени для 90 % сайтов ГСС через Интернет и спутниковую связь. Свыше 50 сайтов ГСС соединены сейчас в дополнительную сеть МСМ и эта тенденция будет расти. Другие 80 сайтов ГСС дополняют покрытие МСМ, предоставляя близкие региональные данные. Инфраструктура Интернета в отдаленных районах была улучшена при помощи ГСС. Финансирование операций и обслуживания обеспечивается Геологической службой США для двух третей сайтов ГСС. Национальный научный фонд (ННФ) закупил оборудование для многих площадок ГСС, но возросшее финансирование со стороны ННФ исследований по угрозам после урагана «Катрина» угрожает выделению средств для операций ГСС и ее возможностей проводить мониторинг Центральной Азии.

Первичной целью ГСС служит фундаментальная наука, что подразумевает длительную поддержку профессиональных сейсмологов для изучения данных, улучшения сейсмических моделей и модификации датчиков системы. Масштабы деятельности и численность занятых в ней лиц слишком дороги для МСМ, чтобы дублировать их. Региональные данные будут значительно обогащены, если больше сейсмических станций было бы вовлечено в обмен сейсмической информации на основе связи почти в реальном времени между МСМ, ГСС и другими отобранными сейсмическими станциями. Это увеличит количество и качество экспортов для коррекции ошибок и улучшения анализа, что предотвратило бы неправильную оценку США события 1997 года в Карском море. Обмен данными с тремя тысячами станциями Международного сейсмологического центра (МСЦ) был бы не столь полезным, поскольку МСЦ получает только фазовые пики от добровольцев, а не данные о форме волн. Бюллетень МСЦ выпускается с задержкой в два года, а это слишком поздно, чтобы оказаться полезным для мониторинга взрывов. Но часть этого очень значительного ресурса могла бы использоваться для содействия МЦД.

### **РЕГИОНАЛЬНЫЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ**

Поскольку поверхностную магнитуду  $M_s$  трудно измерить при значениях ниже 4, становится действительно важным использовать региональные сейсмические волны для дискриминации между возможными источниками сейсмических волн. Мониторинг региональных волн все больше заменяет телесейсмические сигналы, поскольку пороги мощности взрыва лежат сейчас в субкилотонной области. Региональные волны используются по ряду причин: (1) для дискриминации между сейсмическими и источниками (землетрясения или взрывы), (2) для определения магнитуды источника и (3) для определения положения источника, чтобы провести отождествление и инспекцию на месте. Региональные волны в основном распространяются на глубинах менее 100 км, они подвержены сильному воздействию со стороны локальной геологии, что затрудняет интерпретацию. Амплитуды региональных волн обычно больше на расстоянии 1200 км, чем телесейсмические амплитуды на 1800 км. Возможности мониторинга на региональных расстояниях возрастают при развертывании дополнительных сейсмических станций. В районах с повышенными опасениями сейсмографы могут располагаться ближе к подозрительному месту. Магнитуды региональных волн переводятся в телесейсмические магнитуды  $m_b$  для упрощения обсуждений. Региональные волны увеличивают возможность обнаруживать взрывы в полостях с малой связью, поскольку высокочастотные волны легче наблюдаются на региональных расстояниях, а развязка уменьшается при повышенных частотах (12 при 10 Гц) по сравнению с телесейсмическими волнами (70 при 1 Гц). Рассматриваются следующие региональные волны: <sup>20</sup>

- $P_n$  - относительно небольшие продольные волны давления, которые появляются первыми на расстояниях более 100-200 км и в основном распространяются ниже границы кора-мантия.
- $P_g$  - волны появляются первыми, если расстояние меньше 100-200 км; распространяются через «гранитную» кору.
- $L_g$  - поперечные волны с коротким периодом (1-6 секунд) и большой амплитудой, которые появляются после  $P$ -волн, проходят через кору, но тормозятся границами континентов и ослабляются некоторыми горными цепями.
- $S_n$  - поперечные сдвиговые волны, которые появляются после  $P_n$  - волн, но раньше  $L_g$  - волн, двигаясь ниже границы кора-мантия.
- Кода-волны, которые вызваны отражениями от неоднородностей коры и верхней мантии и появляются после прохождения объемных и поверхностных волн.

Мастерство региональной сейсмологии проявляется при анализе событий на полигоне в Семипалатинске. Только 271 подземных ядерных испытаний из 340, проведенных в 1961-1989 гг., были достаточно хорошо документированы на Западе с хорошо определенными временами взрыва, координатами и магнитудами из открытой технической литературы на основе телесейсмических сигналов. Однако, региональные данные относительно 69 оставшихся испытаний стали доступными после холодной войны от сейсмографов, расположенных на расстоянии 500-1500 км от семипалатинского полигона. На основе этих данных Халтурин, Раутиан и Ричардс определили магнитуды для восьми испытаний, положение которых было зафиксировано, но магнитуды оставались неизвестными <sup>21</sup>. Еще для 31 дополнительных испытаний авторы оценили времена взрывов, магнитуды и расположения (для 19 из этих событий). Из оставшихся 30 плохо документированных и необнаруженных испытаний у 15 заявленная мощность была меньше одной тонны, а 13 произошли одновременно с другим испытанием, которое было зафиксировано. Итак, остались только два испытания с заявленной мощностью свыше одной тонны, для которых авторы не смогли найти сейсмические сигналы. Этот впечатляющий результат был получен со старых аналоговых приборов, которые теперь вытеснены цифровыми широкополосными датчиками с широким динамическим диапазоном, ведущими запись в вертикальном и двух горизонтальных направлениях.

## Дискриминация событий

$P_n$ ,  $L_g$  и кода – это региональные волны, которые можно применять для дискриминации между возможными сейсмическими источниками события (землетрясение, химический взрыв или ядерный взрыв).<sup>22</sup>

- Существует гораздо больше диагностической информации в региональных широкополосных спектрах, нежели в узкополосных телесеismicких сигналах, связанных с магнитудами  $m_b$  и  $M_S$ .<sup>23</sup>
- Относительные спектры  $P_n$ ,  $S_n$  и  $L_g$  очень похожи для землетрясений в полосе 0.5-5 Гц<sup>24</sup>.
- Относительные спектры  $P$  и  $P_n$  очень подобны для взрывов,  $S_n$  и  $L_g$  значительно отклоняются от вида  $P$  и  $P_n$  в основном ниже 2 Гц, что указывает на увеличение  $S_n$  и  $L_g$  при уменьшении частоты для меньших и не столь глубоких взрывов (более значительное, чем можно было ожидать). Глубоко проведенные ядерные испытания образуют меньше  $S_n$ .
- После поправок на разное ослабление отношения  $P_n/S_n$  для взрывов очень сравнимы в интервале частот 4-6 Гц. Это отношение при высоких частотах вдвое превышает аналогичную величину, наблюдаемую при низких частотах, для землетрясений, а для взрывов – в пять раз, наводя на мысль, что отношения  $P_n/S_n$  служат надежным селектором. Имитационное моделирование показывает, что отношения  $P/S$  могут оставаться надежными до  $3 m_b$ . Отношения  $P_n/L_g$  обеспечивают полезную селекцию до 1 кт и, возможно, ниже.
- В местах, близких к взрывам, наблюдается значительное присутствие высоких частот (10-100 Гц) по сравнению со взрывами в скалистых породах<sup>25</sup>.
- Огибающие региональной коды (0.03-8 Гц) дают постоянные результаты, если избегать неоднородностей в источнике взрыва и по пути распространения волн, которые затрудняют интерпретацию региональных волн<sup>26</sup>. Очищенные от коды формы  $S_n$ - и  $L_g$ - волн зависят от глубины помещения заряда<sup>27</sup>.
- Небольшие взрывы, проведенные в 10-20 м от неоднородных геологических структур, преобразуют некоторые амплитуды  $P$ -волн в амплитуды  $S$ -волн при частоте 50 Гц<sup>28</sup>. Данные, полученные на расстоянии менее 600 км от бывших полигонов, применяются для разделения взрывов землетрясений<sup>29</sup>.
- Новые сейсмические станции не имели возможности контролировать ядерные испытания и по этой причине должны быть проведены экстраполяции старых данных для согласования анализов новых датчиков.

## Сейсмические модели

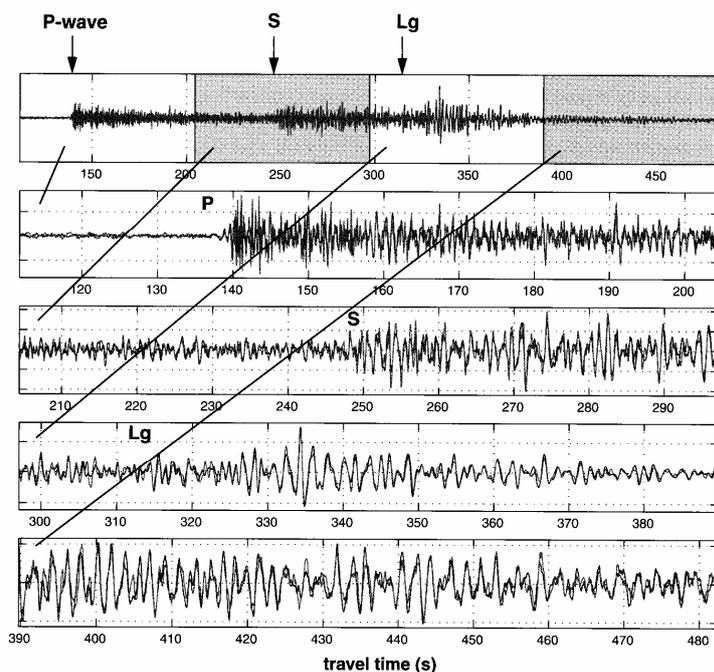
Полученные на поверхности сейсмические данные дают информацию о внутренности Земли, которая, в свою очередь, может быть использована для улучшения дискриминации между землетрясениями и взрывами, а также для улучшения оценок мест взрыва<sup>30</sup>. Модели мантии, коры и осадочных структур получают на основе сейсмограмм путем следования многими траекториями между двумя точками. Такие модели в чем-то сходны с рентгеновскими снимками, но аналогия быстро разрушается. Геотомография не столь точна, как рентгенография, которая основана на измерении амплитуды вдоль прямолинейного пути. Рентгеновские снимки – это измерения прохождения лучами одной частоты без отражений, рефракции или изменения типа волны (например,  $P$  в  $S$  и т.д.), измерения могут быть произведены во всех местах вне тела. Геотомография зависит от прохождения широкой полосы частот многих типов волн, которые преломляются, отражаются и превращаются в волны другого типа, просто не выделяемые датчиками и не наблюдаемые во всех положениях.

Обращая время на участках траектории, можно получать скорости и карты поглощения в одномерной или трехмерной картине для разных типов волн и разных полос частот. Карты скорости применяются для расчета прохождения данной волн чрез Землю и предсказания формы волны на принимающей станции. Обычная методика обратного прогноза меняет на противоположное направление сейсмических волн для определения положения волнового источника. Резко выделяющиеся значения отбрасываются при рассмотрении волн от вычис-

ленного источника до всех датчиков и затем отбраковываются все данные, которые приходят слишком далеко от датчика, наблюдающего событие. Путем итераций вперед и назад, от времен прохождения сейсмике к карте скоростей, а затем от карты скоростей ко времени распространения и волновым формам происходит подгонка сейсмических параметров, пока, наконец, расчетные волновые формы не окажутся похожими на наблюдаемые волновые формы. Скорость и поглощение меняются вдоль траектории в зависимости от места, частоты и типа волны, что усложняет геотомографию. В областях с малой скоростью обычно имеется более высокое ослабление. Параметры скоростей и поглощения для коры и верхней мантии зависят от моделей, но моделирование особенно полезно для дискриминации сейсмических источников и уменьшения ошибок при определении места события, скажем, от 25 км до 18 км в Восточной Евразии и Северной Африке.

### Положение сейсмических источников

Положение сейсмического события обычно определяется измерением времен прихода разных сейсмических волн на нескольких станциях. Двумя основными причинами ошибок служат: (1) ошибки времени прохождения и, что более важно, (2) ошибки скорости сейсмических волн. На основе зависящей от глубины модели скоростей времена распространения преобразуются в расстояния, которые сводятся в расчетную точку положения источника. При глубине свыше 200 км скорость известна с точностью около одного процента, но на меньших глубинах точность падает до примерно 10 %, что имеет отношение к региональным волнам в коре и верхней мантии. Трехмерные сейсмические модели уменьшают эти ошибки, поскольку они более точны для региональных волн, чем модели, зависящие только от глубины.



**Рис.3:** Двойное китайское землетрясение. Волновые формы двух землетрясений (темные и серые линии) очень похожи в течение цикла длительностью 300 с на региональных расстояниях. Подход взаимных корреляций определил положение второго события относительно первого с точностью менее 1 км., что гораздо лучше использования времен распространения от фазовых пиков (P.Ruchards et al., 2006).

Новый подход применяет взаимные корреляции между сходными сейсмическими событиями для уменьшения ошибок при определении положения в 10-100 раз по сравнению с подходом, основанным на временах распространения<sup>31</sup>. Например, региональные волны, прошедшие 500 км, имеют время прохождения около 100 с. Если полная ошибка в модели скоростей равна 5 %, это соответствует ошибке положения 25 км. Но схожие траектории

имеют очень сходные профили скоростей, так что относительное положение все еще может быть точно оценено. С появлением широкополосных цифровых спектрометров более точно анализируются группы прошлых событий между соседними источниками и датчиками, а также между одним источником и соседними датчиками. Эта сеть парных событий уменьшает ошибки модели, вызванные необычными структурами внизу от станции или под источником. Метод двойных разностей связывает соседние события через различия в пути-времени. Он лучше всего работает, если события разделены меньше, чем на несколько км. Взаимные корреляции определяются подходом двойных разностей с использованием нескольких региональных станций, разнесенных на десятки км и находящихся на расстояниях 100-1000 км от события.. Такой подход применялся к регионам в Китае и Северной Америке и привел к ошибке положения 0.15 км . На Рис.3 приведены два похожих события в Китае, которые находились на расстоянии менее 1 км друг от друга.

Приложения такого подхода широко меняются, до 10-95 % сейсмических событий в значительной зависимости от региона, величины сейсмической активности и плотности размещения сейсмографов. Это можно использовать в районах, вызывающих особую озабоченность, например, Лоб Нор и Новая Земля. По мере того, как со временем понижаются уровни порога, могут применяться больше прошлых данных. Ключом к этому подходу станут долгосрочные поручения отдельным сейсмическим станциям увеличить свои архивы волновых форм.

### СЕЙСМИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ

С 1960-х гг. Норвегия (организация NORSAR) работает с сейсмическими решетками, расположенными в Норвегии и на Шпицбергене, которые объединяют сигналы от индивидуальных сейсмометров, сильно ослабляя локальные сейсмические шумы и понижая уровни порогов на 1  $m_b$  ниже, чем в сейсмической сети. Конечная сейсмическая волна формируются в виде луча путем группировки сигналов от каждого датчика с разными временами появления сигнала на основе теоретически расчетных времен появления для каждого датчика (аналогично радару с фазовой решеткой). Путем рассмотрения фаз отдельных волн такой подход формирования луча автоматически обеспечивает определение места взрывов и землетрясений. События с интенсивностью 2-2.5  $m_b$  на расстоянии свыше 2000 км обнаруживаются и идентифицируются сейсмическими решетками, что соответствует заряду менее 0.01 кт при плотном заложении заряда в скалистом грунте или заряду менее 1 кт для взрыва, произведенного внутри крупной полости.

### Корреляция волновой формы

Проблематичные сейсмические сигналы были получены решеткой на Шпицбергене (расстояние до места события 1280 км) и решеткой NORSAR (2320 км) из участка рядом с полигоном на Новой Земле 16 августа 1997 г. <sup>32</sup> . После основного события с магнитудой 3.5  $m_b$  через четыре часа последовало дополнительное событие с магнитудой 2.5  $m_b$  . Две волновые формы были *сильно коррелированы* по времени и в форме, указывая, что два этих события произошли в одном и том же месте с тем же самым механизмом источника. Подобия показали, что второе событие явилось отзвуком первого, которое оказалось землетрясением в Карском море, а не ядерным испытанием. (Смотрите детальное обсуждение в разделе *Три недавних события типа ядерных испытаний*). В другом эксперименте группа NORSAR использовала шаблонную форму волны от землетрясения интенсивностью 3.5  $m_b$  для обнаружения и идентификации слабых событий (порядка 0.5  $m_b$  ) на расстоянии 600 км. Скорость фальшивых сигналов тревоги на решетках с большими размерами была гораздо ниже, чем на решетках меньших размеров. Корреляционный подход оказывается очень мощным средством для исследования событий на ядерных полигонах, а сейчас он расширяется для контроля землетрясений и химических взрывов.

## Обнаружение корреляции

Этот подход применялся для исследования 11 химических взрывов в полостях с объемом от 200 до 1000 м<sup>3</sup> в Альвдалене (Швеция), в 142 км от решетки NORESS<sup>33</sup>. Формы сейсмических волн сравнивались с полученными результатами от известного события в узкой полосе частот 14018 Гц с оптимальным соотношением сигнал/шум. Все пять химических взрывов с мощностью по одной тонне автоматически были обнаружены решетками NORESS и NORSAR в течение года с очень низким уровнем фальшивых событий. Решетка в Шпицбергене была способна зафиксировать взрыв в скалах на расстоянии 50 км. Обнаружение корреляций ограничено сравнением сигналов, исходящих из зоны размером 1-2 длины волны, - это примерно равно 10 км при 1 Гц. События, где проявляется корреляция, должны демонстрировать небольшие изменения механизма источника и изменения со временем. Обнаружение корреляции может исключить взрывы на рудниках, но обратит внимание на ядерные взрывы в данном месте. При таком обнаружении используется очень малое отношение сигнал/шум. Предположив, что вероятность ложной тревоги равна 10<sup>-6</sup>, Фроде Рингдал и его коллеги по NORSAR подсчитали отношение сигнал/шум в децибеллах (считая, что это отношение, равное единице, соответствует 0 дБ), требуемое для получения 90 %- ной вероятности обнаружения. Они получили 7 дБ для одного датчика (отношение сигнал/шум – ОСШ, равно 5), -3 дБ для решетки с 9 элементами (ОСШ = 0,5) и от -15 до -20 дБ для более сложных конфигураций (ОСШ = 0.03-0.01). Когда существуют предшествующие данные, взаимная корреляция волновых форм оказывается в 10-100 раз более точной при определении положения по сравнению с обычными методами сравнения времен. NORSAR приводит следующие выводы:

Мы предоставляем факты, что корреляторы могут использоваться для снижения порогов обнаружения на 0.5 до 1 единицы магнитуды по сравнению со стандартными алгоритмами детектирования энергии.. Поэтому они предлагают, грубо говоря, такое же улучшение эффективности обнаружения, какое достигается заменой одиночных датчиков решетками. Такое улучшение может быть получено в добавление к увеличению чувствительности, которое предоставляется решетками. Тот факт, что корреляторы конкретны для отдельных источников, делает их привлекательными в качестве классификаторов событий. Такая особенность может быть использована для создания эффективных экранов от взрывов на рудниках или отзвуков землетрясений.

## ИНФРАЗВУКОВОЙ, ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ И РАДИОНУКЛИДНЫЙ МОНИТОРИНГ

### Инфразвук

Инфразвук (0.01-10 Гц) имеет очень низкую возможность обнаружения небольших подземных ядерных испытаний, но он способен дискриминировать атмосферные ядерные взрывы от химических взрывов и землетрясений<sup>34</sup>. Суммирование давлений в узлах аксиальной решетки труб снижает флуктуации некогерентного шума, хотя когерентный инфразвук остается. Пространственная триангуляция применяется для определения положения атмосферного события, что может превзойти сейсмическое определение места взрыва, если мало энергии передается грунту. В инфразвуковом мониторинге МСМ применяется редкая сеть с расстояниями между узлами 2500 км. Большие и малые апертуры используются для измерений низких частот (0.03-0.1 Гц) и для частот более 1 Гц. Временные и частотные взаимные корреляции применяются для получения характеристик сигнала, чтобы дискриминировать механизмы источника. Скорость ветра увеличивает ветровые шумы, которые возрастают на 20 дБ при изменении скорости ветра от 1 м/с до 5 м/с. При подземных взрывах сейсмическая сеть дает гораздо лучшую точность положения, нежели инфразвук, но меньшую по сравнению с интерферометрическим радаром с синтезированной апертурой, установленном на спутнике, если они наблюдают за положением испытания. США могут обнаружить атмосферные испытания при помощи специальных приборов ( т.н. бхангметров, следящих за световой вспышкой ядерного взрыва), располагаемых в космосе. но другие стра-

ны, участвующие в ДВЗЯИ, предпочли инфразвуковые датчики для МСМ, так как не обладают такими приборами. Группа НАН пришла к выводу, что пороги обнаружения двумя инфразвуковыми станциями составят менее 1 кт для расположения по всему миру и менее 0.5 кт при расположении на континентах в северном полушарии. Как показал NORSAR, что имеется сильная корреляция между сейсмическими сигналами и инфразвуковыми сигналами от взрывов на рудниках<sup>35</sup>. Химические взрывы мощностью 0.019 кт наблюдались на расстоянии 2000 км, но возможности обнаружения могут быть значительно уменьшены, если наблюдающая станция расположена против ветра относительно источника или линия станция-источник перпендикулярна направлению стратосферного ветра.

Акустическое давление в узле труб зависит от скорости звука, что приводит к зависимости от частоты. Два новых подхода обладают преимуществом того факта, что скорость света не зависит от частоты.

### **Пьезоэлектрические датчики**

Решетка из 90 пьезоэлектрических датчиков подсоединена к стенкам трубы трехосного инфразвукового детектора<sup>37</sup>. Оцифрованные сигналы суммируются и коррелируются с гораздо более высокой сложностью и коррекцией на изменение давления в узле аксиальной решетки. Мощность шумов уменьшается обратно пропорционально количеству датчиков, а сигналы усредняются и не коррелируются, но корреляция между многими датчиками уменьшает шум от ветра больше, чем 1/п.

### **Инфразвуковой датчик с оптическим волокном (ИДОВ)**

Оптическое волокно расщепляется на две нити, которые по отдельности наматываются на гибкую трубу, позволяющую растягивать оптический путь, когда давление деформирует трубу. Изменение длины пути измеряется с помощью интерферометров и лазерного импульса, который разводится в два волокна и сводится на другом конце трубы перед фотодетектором. Интеграл от давления измеряется с учетом волны и ее производной, что дает эллипс<sup>38</sup>. Предварительные эксперименты подсказывают, что шум от ветра уменьшается на 20 дБ при небольшом ветре со скоростью 1 м/с (полоса частот 1-10 Гц). Температурный разброс должен быть уменьшен для получения хороших данных, аналогичных для традиционных сборок на трубах. Оптическая поляризация в обеих нитях должна быть параллельной, а не сдвинутой на 90°. Решетка ИДОВ, смонтированная на нескольких трубах обладает потенциалом улучшения обнаружения сигнала, дискриминации источников и направления скорости.

### **Гидроакустический мониторинг**

Распространение акустических волн в океане обладает малой дисперсией и небольшой скоростью потерь в океаническом канале. Для дискриминации между океанскими землетрясениями и взрывами (основная мощность лежит в диапазоне 5-100 Гц) применяются гидроакустические датчики. Если событие в океане не образует сильного гидроакустического сигнала, то событием с уверенностью относится к землетрясениям<sup>39</sup>.

Определения положений событий с помощью гидроакустических данных обладают умеренной точностью (30 км на расстоянии 1000 км с помощью горизонтальной решетки), но они дополняются более измерениями, полученными из сейсмологии. Рабочая группа НАН пришла к заключению, что гидроакустический мониторинг обладает «порогом гом мощности в несколько кг для большинства океанов в Южном полушарии. Почти все океанские бассейны в мире будут контролироваться с порогом лучше одной кт»<sup>40</sup>. Сеть МСМ из шести станций с гидрофонами и пяти (с меньшими возможностями) станций для Т-фазы<sup>41</sup> будет иметь более высокую чувствительность в Южной полусфере, а сейсмическая сеть более чувствительна в Северном полушарии. Международный центр данных разработал гидроакустический оценщик азимута и замедления для дискриминации механизмов событий и определения азимутального положения с точностью 1° с небольшим числом ошибочных указаний, вызванных особенностью взрыва, образующего большое количество пузырьков в импульсе.

Энергия взрыва хорошо закачивается в океанский волновод (особенно эффективно в

глубоких океанах), но мелкие океаны могут заблокировать акустическую энергию от попадания в океанский волновод. Землетрясение 2004 года на Суматре дало гораздо больший сигнал на южной стороне острова Диего Гарсия по сравнению с северной стороной (где наблюдалось уменьшение на 32 дБ при 20 Гц)<sup>42</sup>. Прореагировав на трагическую смерть 300000 человек, сеть МСМ сократила свой срок предупреждения о цунами с двух часов до 20 минут и сделала свои данные конфиденциально доступными. Модели гидроакустической блокировки определили времена распространения с точностью 0.1-5 % с использованием подводной географии, температуры, солёности и неровностей поверхности<sup>43</sup>. Базы данных и эксперименты используются для улучшения этих инструментов.

### Радионуклидный мониторинг

Обнаружение радиоактивных ядер от деления предоставляет четкую идентификацию того, что событие было ядерным взрывом, как это было в случае испытания в 2006 году, проведенного Северной Кореей (смотрите раздел *Три недавних случая ядерных испытаний*). Через два дня после испытания мощностью 0.6 кт было обнаружено 300 ядер радиоактивного ксенона, что подтвердило ядерный характер испытания. Станция МСМ на Северо-западе Канады внесла в это свой вклад. Информация, собираемая на отборнике радиоактивных проб, требует дни или недели для сбора и анализа. При советских подземных ядерных испытаниях на Новой Земле в 90 % случаев за период с 1964 г. по 1988 г. радиоактивные продукты уходили в атмосферу. США также загружали атмосферу в течение десятилетий. Радионуклиды благородных газов (особенно ксенона) исключительно трудно удержать от распространения. Радионуклидная сеть МСМ спланирована так, чтобы обеспечить обнаружение 10 % радиоактивных благородных газов, образованных при подземном взрыве мощностью 1 кт и попавших в атмосферу. Благодаря успехам, описанным ниже, рабочая группа НАН пришла к выводу, что во многих местах этот порог уменьшается на порядок величины. «Современные оценки устанавливают пределы порога от 0.1 до 1.0 кт для ядерных взрывах на суше и порог 1-2 кт в океанах»<sup>44</sup>. Далее рабочая группа заключила, что вероятность обнаружения будет превосходить 90 % на большей части Европы и Азии и окажется выше 50 % над большей частью южных океанов. Определение положения источника не оказывается точным, поскольку это зависит от моделей, где использованы сведения о ветре и погоде.

Сорок из 80 радионуклидных станций будут контролировать изотопы радиоактивного ксенона. Прототипы соответствующего детектора были созданы в Франции, России и Швеции, а американская Тихоокеанская Северо-западная национальная лаборатория (ТСНЛ) разработала Автоматический пробоотборник/анализатор радиоактивного ксенона (АПАРК), который обнаруживает низкие уровни содержания четырех радиоактивных изотопов ксенона. АПАРК (1) отбирает воздух с очень высокой скоростью, (2) использует счетчики гамма- и бета-совпадений с высокой эффективностью, (3) сводит к минимуму число фоновых отсчетов, (4) сводит к минимуму содержание радона в выделенных образцах ксенона, (5) проводит короткие циклы непрерывного разделения с быстрым последующим анализом газовых образцов и (6) работает без оператора и без значительного обслуживания<sup>45</sup>. Система АПАРК уменьшает 40 м<sup>3</sup> воздуха за 8 часов до объема около 10 см<sup>3</sup>, состоящего из 50 % ксенона и 50 % азота. Это проявление изобретательности включает в себя сложное улавливание ксенона, очищение ксенона, определение количества ксенона и измерение радиоактивного ксенона. Минимальная обнаруживаемая концентрация Xe-133 равна 0.1 мБк/м<sup>3</sup> (0.4 отсчета/м<sup>3</sup>-час) и Xe-135 – 0.5 мБк/м<sup>3</sup>, которая на порядок величины ниже проектной величины 1 мБк/м<sup>3</sup> (при 24 часах улавливания). Проведенные в АПАРК измерения показывают, что уровни Xe-133 в окружающем воздухе могут значительно изменяться вблизи ядерных реакторов от нормальных значений 0.7-1.5 мБк/м<sup>3</sup> до величин, превышающих 20 мБк/м<sup>3</sup>.

МСМ развертывает как обслуживаемые вручную, так и автоматические радионуклидные системы. Например, АПАРК также разработал пробоотборник и анализатор для радионуклидных аэрозолей (ПАРА), который обладает чувствительностью выше миллиона радиоактивных ядер, прикрепленных к аэрозолю или пыли. Эта величина соответствует 10<sup>-17</sup> от 10<sup>23</sup> радионуклидов, образованных при испытании с мощностью 1 кт. Как заявила ТСНЛ, одна установка ПАРА в конечном итоге обнаружит атмосферный взрыв в любом месте того же полушария, где она находится. Исследуется новый возможный датчик, разделяющий аэрозоли по их размеру<sup>46</sup>. В нем использовано то преимущество, что аэрозоли от атмосферных

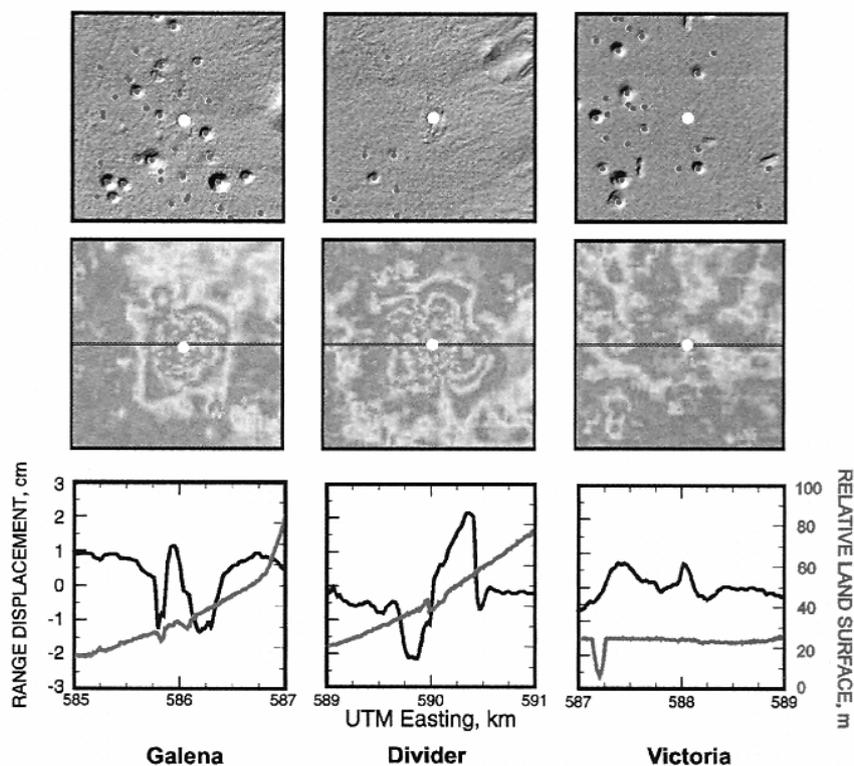
взрывов имеют диаметры менее 01 мкм, аэрозоли от подземных исследований – меньше 1 мкм, а аэрозоли с естественной радиоактивностью – между 0.1 и 1 мкм. Кроме того, традиционный отбор радиоактивных примесей при инспекции на месте может определить, имело ли место ядерное испытание или нет<sup>47</sup>.

## ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ РАДАР С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

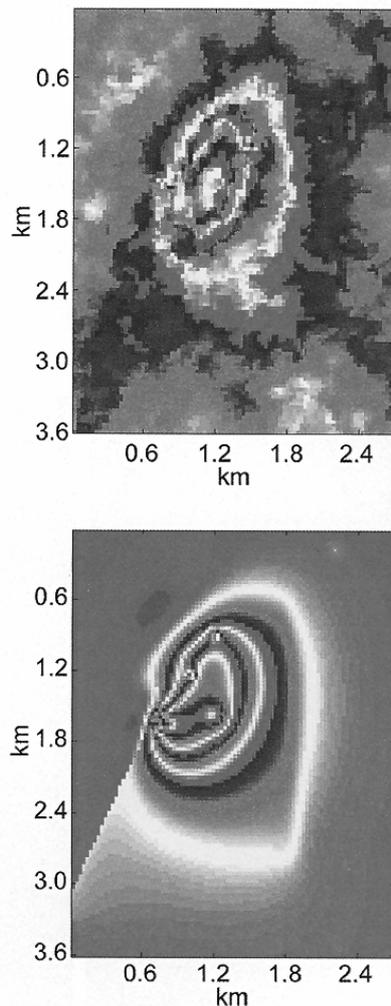
Секретные системы космического базирования проводят мониторинг оптических, инфракрасных, радарных и коммуникационных сигналов, не говоря о ядерных частицах и электромагнитном импульсе. В этой статье будет обсуждаться только относительно новый интерферометрический радар с синтезированной апертурой (ИнРСА). ИнРСА отлично дополняет возможности МСМ для испытаний порядка 1 кт на глубине до, по крайней мере, 500 м.. Результаты ИнРСА не столь своевременны, как сейсмология, но дискриминация и измерение положения могут в ряде случаев превосходить то, что дает сейсмология. Радар с синтезированной апертурой (РСА) создает детальные изображения поверхностей, даже если они закрыты густым облачным покровом. Спутники с РСА передают радарные импульсы и получают отраженные сигналы, а сам спутник при движении по своему заданному пути синтезирует антенну с большой апертурой. Сигналы, отраженные от целей, имеющих направленную вперед скорость, имеют положительное доплеровское смещение и наоборот, что создает одномерную карту. Второе измерение образуется из анализа времени. Увеличение сроков сбора и компьютерной обработки увеличивает эффективный размер антенны, от чего возрастает пространственное разрешение изображений РСА. Сравнивая изображения от САР, полученные в различные моменты при очень похожих положениях на орбите, изображения ИнРСА измеряют изменения топографии (деформации) с точностью до 2-5 мм. Картинки ИнРСА, где приводится оседание грунта после подземных испытаний в Неваде и на Лоб Норре, были получены Полем Винсентом со спутника ERS Европейского космического агентства и спутников Envisat, а также с канадских и японских спутников<sup>48</sup>. РСА и ИнРСА способны также обнаружить подготовку полигона и другие признаки ядерных испытаний. ИнРСА может применяться для изучения оседания грунта над туннелями, для управления землепользованием, измерения влажности почвы, подъема уровня воды, характера стоков рек (объем и осадки), повышения уровня моря, толщины ледников и их динамики, а также измерений в реальном времени сейсмологических событий, ИнСАР стал сейчас широко усвоенной технологией, доступной всем странам-участницам ДВЗЯИ за разумные цены от коммерческих продавцов. Данные от канадского спутника Radarsat с РСА (горизонтальное разрешение 8 м, 50 км x 50 км) стоят 3000 долларов плюс 1000 долларов за срочность (2-6 часов после получения)<sup>49</sup>. Усложненное математическое обеспечение для ИнРСА стоит 20-40 тысяч долларов. Для отдельных мест появятся данные РСА с метровым разрешением по горизонтали, доступные из коммерческих источников, что улучшит разрешение ИнРСА. США имеют четыре спутника Lacrosse, каждый из которых проходит над большинством наземных полигонов два раза за сутки. Информация, получаемая от национальных технических средств, и совместные измерения (смотрите раздел *Совместный мониторинг испытательных полигонов*) могут быть использованы Исполнительным Советом ДВЗЯИ, если эти данные получены в соответствии с международным законом о требовании инспекции на месте (статья IV.D.37).

Отраженные лучи радара несут в себе два вида информации: амплитуду и фазу, которые ИнРСА объединяет в каждый пиксель из данных, получаемых до и после подземного ядерного испытания. Результатом становится карта с интерференционной картиной. Топография плюс осаднение почвы получают из второго наблюдения РСА, но интерференционное изображение, когда оно получается от двух почти идентичных условий наблюдения с орбиты, измеряет осаднение почвы после удаления топографии<sup>50</sup>. Когда спутник возвращается в то же самое положение над Землей, фаза изображения должна оставаться такой же, если ничего не случилось. Если это не так, то что-то произошло, например, осаднение грунта. *Метод двойной разницы* использует три изображения РСА одного и того же места. Интерферограмма, полученная от первых двух изображений РСА, вычитается из интерферограммы от последних двух изображений РСА для получения интерферограммы с двойной разницей. Путем использования нескольких интерферограмм от разных промежутков вре-

мени можно свести к минимуму фон для осаждения от рассеяния в атмосфере и на растениях. При другом подходе, использованном Винсентом, получается интерферограмма от двух изображений РСА и затем вычитается карта *цифровой модели возвышений* (ЦМВ) для получения осаждения почвы. Эти подходы позволили измерить осаждения почвы с точностью до 2 мм (Невадский полигон и Юбилейная линия метро в Лондоне) и 5 мм в остальных местах. Такой подход оказывается успешным, даже когда не образуется заметный кратер. ИнРСА может различать землетрясения (асимметричная картинка) и взрывы (круговая форма). Информация ИнРСА обладает горизонтальным разрешением 30 м, что гораздо меньше типичных размеров кратера (100 м). ИнРСА улучшил оценки положения источников землетрясений на 20 км в ряде случаев. Диаметр осаждения около 1 км приводит к площади, которая в 100 раз больше, чем у видимых кратеров. Типичный кадр радара покрывает 10000 км<sup>2</sup>, что достаточно для изучения больших площадей. ИнРСА способен следить с точностью лучше 100 м за прямыми инспекциями на месте для поиска радиоактивности и других свидетельств испытания, что гораздо лучше, чем зона поиска в 1000 км<sup>2</sup>, разрешенная ДВЗЯИ для инспекций на месте. Динамические измерения ИнРСА могут непосредственно наблюдать сейсмические волны во время события с воздушных платформ, но такой подход слишком дорог для мониторинга в рамках ДВЗЯИ.



**Рис. 4:** Осаждение почвы после трех ядерных испытаний на полигоне в Неваде в 1992 г. В верхнем ряду приведены цифровые карты возвышений с разрешением 10 м, где указаны места подземных испытаний (кружки). В среднем ряду интерференционные картинка отображают циклические вертикальные смещения (2.8 см), прошедшие в интервале времени между двумя картинками РСА. В нижнем ряду приведены профили почти вертикального смещения (масштаб указан на левой шкале) и топографию поверхности (масштаб справа). При испытаниях Galena (слева, 3.9 M<sub>L</sub>) и Divider (на среднем рисунке, 4.4 M<sub>L</sub>) отчетливо видны осаждения, но при испытании Victoria (справа, 2.7 M<sub>L</sub>) осаждения не были замечены. (Винсент, 2003).

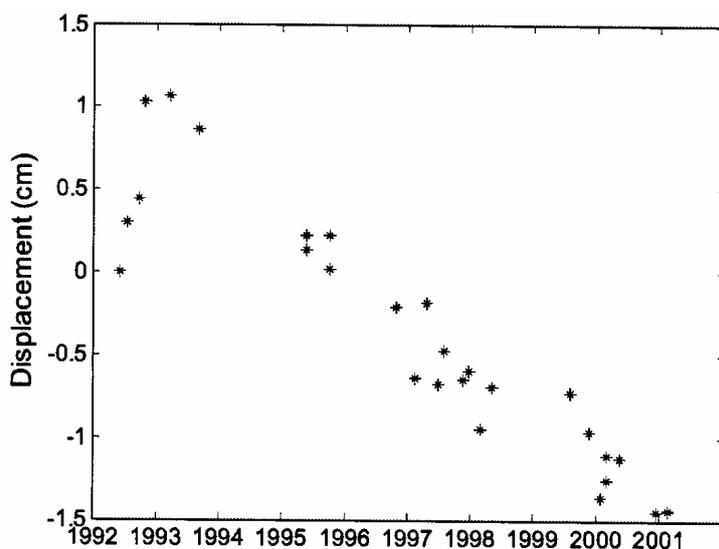


**Рис. 5:** Сравнение теории с данными ИнРСА. Данные ИнРСА с полигона в Неваде (верхний рисунок) сравниваются с расчетами по упругим моделям с конечными элементами (нижний рисунок), которые принимают во внимание локальную геологию (P.Vincent).

Около 40 трехосных сейсмографов были установлены на Невадском полигоне или рядом с ним. Данные для трех ядерных событий, приведенных на Рис. 4, таковы (локальные магнитуды и глубина погружения заряда): Galena ( $3.91 M_L$ , 401 м), Divider ( $4.39 M_L$ , 340 м) и Victoria ( $2/65 M_L$ , 244 м). Эти локальные магнитуды можно интерпретировать при помощи эксперимента без распространения (ЭБР) – взрыва 1.4 кт смеси топливной нефти с нитратом аммония (22 сентября 1993 г.,  $4.06 M_L$ , 405 м). Джек Мэрфи пришел к выводу, что сейсмические сигналы от химических взрывов вдвое выше, чем от ядерных взрывов в скалистом грунте при сравнимых компонентах частот, что дает *эффективную ядерную мощность* для ЭБР, равную 2.8 кт.<sup>51</sup> Используя принятые НАН правила для перевода магнитуды в мощность, получаем, что легко наблюдаемые Galena и Divider имели мощности 2 кт и 6 кт, соответственно, а ненаблюдаемая Victoria обладала мощностью 0.1 кт. Поскольку Galena наблюдалась очень хорошо (Рис. 4), ИнРСА отождествлять ядерные испытания и определять место их проведения при мощностях менее 1 кт, проведенные на глубинах до 400 м, с точностью локации 100м, если доступны данные РСА, полученные до испытаний.

Длительное осаждение почвы продолжается по мере того, как уменьшаются подземные нарушения из-за усадки и закрытия пустот в вытяжных трубах, гравитационных усадок крупных отслоившихся зон или сдвигов по соседним повреждениям (Рис. 5). Винсент использовал ИнРСА для определения времен релаксации осаждения (мм/год) для 11 ядерных испытаний с мощностью выше 20 кт за период 1989-1992 г. Эти крупные испытания проводились на средней глубине 613 м и обладали локальными магнитудами от 5.03 до 5.75 (среднее значение 5.4). Винсент показал, что положение ядерных испытаний может быть определено,

когда нет данных ИнРСА до испытания, и это позволило ему определить характеристики 12 дополнительных взрывов. Начальные темпы релаксации осаждения для 17 испытаний сильно менялись в диапазоне 0.43-6.95 см/год, что связано с различной геологией, окружающей средой при взрыве (туннели и шахты) и развитием событий со временем. Темпы осаждения уменьшаются со временем с постоянной экспоненциального затухания, составляющей около 0.01-0.06 в год в то время, как избыток давления в испытательной полости за период 1992-99 гг. снизился с 42 атм до 37 атм. Порог для обнаружения и идентификации испытаний без предварительной информации от РСА находится выше 20 кт, что представляет незначительный интерес для мониторинга ДВЗЯИ, поскольку сейсмология на таком уровне обладает исключительно четкими представлениями. Но 100-метровая точность определения положения с помощью ИнРСА вполне уместна.



**Рис.6:** Осаждение на Юбилейной линии. Измерение возвышения площадки над туннелем лондонской Юбилейной линии метро от снимков ИнРСА указывает на осаждение, которое изменяется линейно со временем (на 2 см с 1993 до 2001 гг., над туннелем глубиной 20 м. Точность отдельного измерения лучше 0.2 см (Дж.Ренни, 2005)

### Ограничения на ИнРСА

Несекретные данные ИнРСА можно получить с иностранных спутников, хотя рабочая группа ИнСАР в США планирует несекретный спутник РСА. Чувствительность ИнРСА зависит от мощности испытаний, глубины заложения заряда, геометрии полигона (горизонтальный или вертикальный) и возможности локальной геологической структуры поддерживать крышу над полостью. ИнРСА измеряет осаждение с точностью 0.2-0.5 см с пороговой мощностью менее 1 кт на глубинах, по крайней мере, 400 м, когда имеются предварительные данные от ИнРСА, и около 20 кт, когда таких данных нет. Для ранее не обнаруженного осаждения над Юбилейным туннелем метро в Лондоне теперь наблюдается линейное уменьшение со временем при точности 0.2 см, вызванной разбросом отдельных измерений (Рис. 6)<sup>52</sup>. Относительное осаждение определяется по фиксированной высоте соседних зданий или геологических структур. Основной источник ошибок вызван флуктуациями рассеяния на парах воды (не облаков), что сокращается при усреднении по нескольким сеансам сбора данных. В ошибки дают вклад также движения деревьев и другой растительности, а также изменения ледового покрытия.

## СОВМЕСТНЫЙ МОНИТОРИНГ НА ПОЛИГОНАХ

### Мониторинг рядом с экспериментами

Инспектор и инспектируемые страны могут совместно осуществлять мониторинг, во-первых, при небольших испытаниях вблизи полигона и, во-вторых, при подкритических экспериментах на очень близком расстоянии без нанесения ущерба секретности. Данные могут быть опубликованы, если обе страны пойдут на это. Взрывы с мощностью менее 1 кт имеют меньшее военное значение, но совместный близкий мониторинг значительно понижает пороги контроля, уменьшая подозрения. При совместном мониторинге можно определить, оказался ли эксперимент гидроядерным, что является нарушением ДВЗЯИ, или гидродинамическим, что разрешено.<sup>53</sup> Переговоры по ДВЗЯИ определили гидроядерные испытания как обладающие ядерной мощностью менее 1800 г тротилового эквивалента, а при гидродинамических испытаниях не достигается ядерная критичность Джонс и фон Хиппель подсчитали полные радиационные дозы на расстоянии 2 м для различных ядерных экспериментов и предложили пороги мониторинга в диапазоне от микрограммов до граммов тротилового эквивалента.<sup>54</sup> Они пришли к выводу, что совместный мониторинг «должен быть адекватным проверке того, что ядерные мощности выше граммов тротилового эквивалента не наблюдались, даже если разрешена возможность значительного экранирования».

### Гидродинамический-гидроядерный порог

Испытание можно рассматривать как законное гидродинамическое испытание, если нейтронный флюенс от деления меньше естественно возникающего нейтронного флюенса от спонтанного деления. Четыре кг плутония оружейного качества (6 % плутония-240) выделяют  $2.2 \times 10^5$  спонтанных нейтронов в секунду. Это дает поток нейтронов на расстоянии 2 м, равный  $0.2/\text{см}^2\text{-сек}$ , если половина нейтронов выходит за пределы устройства. Детектор за неделю на расстоянии 2 м получит  $1.3 \times 10^5/\text{см}^2$  нейтронов, что соответствует 0.4 мг эквивалента. Если эксперимент приведет к удвоению нормальной дозиметрической дозы, выход от деления 0.4 мг должен иметь место. Активное вмешательство может усложнить дело. Включаемый и выключаемый источник из бериллия и америция-241 выдает  $10^8$  нейтронов в импульсе, что приводит к нейтронному флюенсу  $100\text{-}1000/\text{см}^2$ , а этот результат можно рассматривать как ошибочный положительный. Импульсные нейтронные генераторы ( $10^{11}$ ) и быстрые критичные сборки ( $10^{17}$ ) могут внести еще большие осложнения. Эти результаты показывают, что пассивная дозиметрия точна, меньше вводит в заблуждение и не столь политична. Группа ДЖЕЙСОН оценила, что пределы мониторинга в 1 мг эквивалента (1 нанотонна) могут быть получены пассивными дозиметрами.<sup>55</sup> Эта группа пришла к заключению, что активные измерения с применением внешнего нейтронного источника бесполезны для определения того, имеет ли место критичность, поскольку источник «будет серьезно влиять на другие диагностики и, возможно, сможет спровоцировать ошибочное положительное измерение».

### Мониторинг рядом с полигоном

Разведывательное сообщество заинтересовано в увеличенных возможностях, чтобы больше узнать о других странах, а Министерство обороны хочет меры с меньшим потенциалом измерений для защиты своих секретов. Предельным выбором становится политический компромисс. Ниже дается описание правдоподобного режима для слежения за ядерными экспериментами на расстоянии в пределах километра от полигона.

*Пассивная сейсмика для небольших ядерных испытаний.* Количество повторных толчков, следующих за ядерным взрывом, слегка меняется с мощностью в пределах 1-10 кт.<sup>56</sup> Локальные сейсмографы, установленные за несколько км от места ядерного взрыва, обнаруживают свыше 50 слабых повторных толчков с магнитудами 1-2 после взрыва с магнитудой 4-5. Сейсмические детекторы надо располагать в спокойном месте, вдали от шумящей техники. Несколько сейсмометров, расположенных в разных местах, смогут определить положение сейсмического источника. США стандартно измеряли низкие магнитуды повторных

толчков вплоть до  $-3 m_b$  рядом с полигоном в Неваде.<sup>57</sup> Этот уровень соответствует пассивному сейсмическому порогу менее 10 кг ( $10^{-5}$  кт). Полезно калибровать полигон несколькими небольшими химическими взрывами, чтобы лучше понять локальные сейсмические сигналы. Два техника могут установить за несколько дней коммерческие системы, которыми относительно легко управлять. Фальшивые положительные результаты от химических взрывов, взрывов и падения скал, а также от человеческой активности могут быть отброшены с помощью инфразвуковых микрофонов.

*Обнаружение радиоактивного ксенона.* Соединенные Штаты и бывший Советский Союз имели значительные трудности с предотвращением случайных выбросов радиоактивных изотопов от ядерных испытаний. Особенно трудно удержать благородные газы (Xe-135, Xe-133 и Ar-37). Их появление служит сильным доводом для того, что ядерное испытание имело место (Смотрите раздел *Радионуклидный мониторинг*). Упомянутый в этом разделе прибор АПАРК понизил уровень порога обнаружения в десять раз до  $0.1 \text{ мБк/м}^3$  ( $0.4 \text{ отсчета/м}^3\text{-час}$ ), а прибор ПАРА, развернутый на площадках МСМ имеет уровень порога обнаружения  $0.01 \text{ мБк/м}^3$ .

*Непосещаемый видеомониторинг.* Данные, полученные практически в реальном времени, могут быть заложены в память и затем восстановлены по телесвязи. Твердотельная технология нуждается в небольшом уходе.

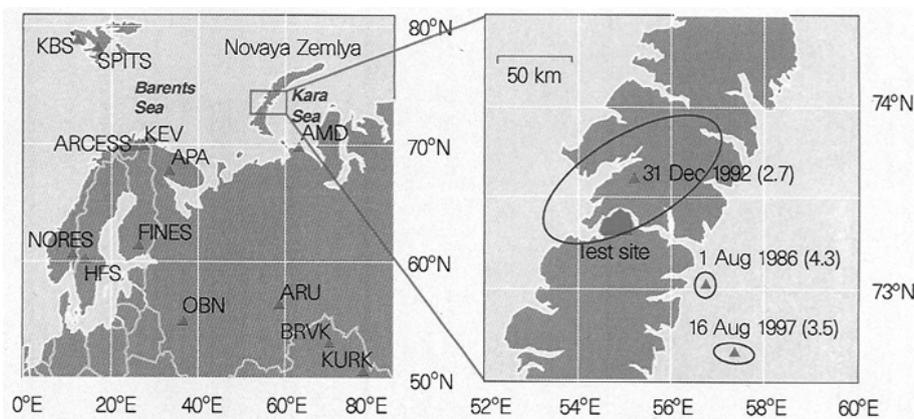
*Электромагнитный импульс.* При экспериментах с критичностью испускается легко измеряемый электромагнитный импульс (ЭМИ) вблизи места проведения эксперимента. ЭМИ от подземного ядерного испытания сильно поглощается в почве. Впрочем, низкочастотные компоненты, которые ослабляются как четвертая степень расстояния, наблюдаемы, если разместить индукционные катушки и антенны в пределах ста метров от места испытания мощностью  $0.1 \text{ кт}$ . Молнии также служат источниками ЭМИ, но этот фальшивый сигнал может быть сведен к нулю при совместных испытаниях или при установке схем отторжения для постоянного развертывания. В частотном диапазоне ниже 10 кГц не содержится информация о конструкции оружия, но более высоких частот следует избегать, поскольку такая информация может содержаться в этом диапазоне радиочастот. Измерения ЭМИ могут сыграть уникальную роль, поскольку ядерный взрыв создает более сильный сигнал ЭМИ, чем химический взрыв такой же мощности.

## ТРИ НЕДАВНИЕ СОБЫТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЯДЕРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

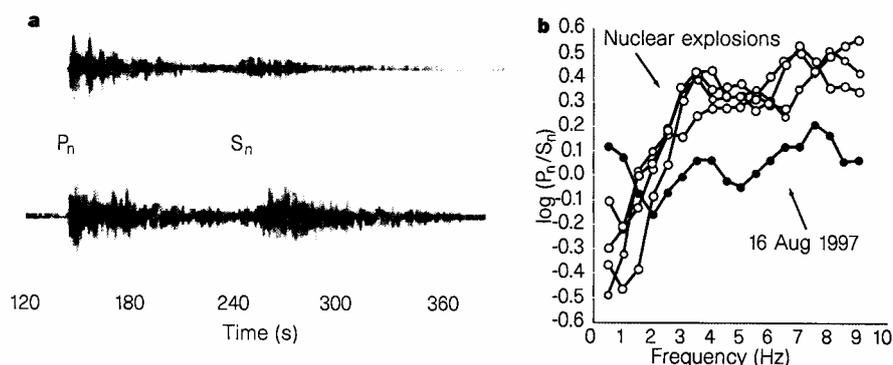
### Отрицательное событие в Карском море в 1997 году

Небольшое сейсмическое событие произошло вблизи полигона, расположенного в северной части Новой Земли, 16 августа 1997 г. Через несколько дней неправительственные сейсмологи определили место события на расстоянии 100 км от Новой Земли в Карском море на глубине 400 м (Рис. 7)<sup>58</sup>. Такое место означает, что событие было не ядерным испытанием, а землетрясением. Но через две недели Министерство обороны США и Государственный Департамент заклеили это событие как обладающее «взрывными характеристиками», а через месяц после события американские агентства все еще характеризовали событие как «нерешенное» или «подходящее для альтернативных интерпретаций». Это была ошибка американских агентств, но не Организации ДВЗЯИ. На Рис. 8 приведены сейсмические данные из Карского моря, полученные в Северной Финляндии, вместе с данными от целого спектра советских ядерных испытаний на северной части Новой Земли. Эти данные показывают, что событие в Карском море было землетрясением, поскольку отношение P/S на более высоких частотах (2-9 Гц) гораздо меньше, чем ядерных взрывов. Более того, временная задержка между P и S волнами на 8 секунд длиннее для события в Карском море по сравнению с ядерными испытаниями на Новой Земле, а это подразумевает, что событие могло не произойти на полигоне. Дальнейшее подтверждение исходит от небольшого повторного толчка ( $m_b = 2.5$ ), которое произошло через четыре часа после основного события ( $m_b = 3.5$ ) и было обнаружено решетками NORSAR (удаление на 2320 км) и на Шпицбергене (удаление 1300 км). Корреляционный анализ волновых форм показал, что механизм источника для обоих событий был одинаков и что положения двух событий были удалены друг от друга меньше, чем на один км.<sup>59</sup> Было проверено шесть независимых методов, показавших,

что событие было землетрясением, а не ядерным испытанием: (1) отношение P/S, (2) амплитуда на высокой частоте (3-9 Гц), (3) положение, (4) S-P разница во времени, (5) сходство с данными о повторном толчке и (6) сходство формы волны с землетрясением 1986 г., произошедшего в том же самом месте. Событие в Карском море показало, что мониторинг сейсмическими решетками надежен до менее, чем  $2.5 m_b$  (0.01 кт), вблизи Новой Земли.



**Рис. 7:** Точность положения события в Карском море. Положение полигона на Новой Земле и землетрясений (с магнитудами, относящимися к 1986-1997 гг) показаны вместе с эллипсами ошибок для высокой достоверности (90 %). NORSAR позже показал, что событие 16 августа 1997 г. находилось в пределах одного км от его небольшого повторного толчка (P. Richards and W. Y. Kim, 1997).



**Рис. 8:** Событие в Карском море в сравнении с данными о ядерных испытаниях. Слева сверху приведена сейсмограмма от советского ядерного испытания 24 октября 1990 г., зафиксированное сейсмической станцией KEV в Северной Финляндии, расположенной в 1048 км от северного полигона на Новой Земле, а слева внизу – сейсмограмма от события в Карском море, находившегося в 1127 км от станции. Событие в Карском море имеет гораздо меньшее отношение P/S в диапазоне 309 Гц по сравнению с этим параметром для ядерных взрывов (P. Richards and W. Y. Kim, 1997).

### Индийские и пакистанские испытания в 1998 г.

Индийские и пакистанские ядерные испытания 11, 28 и 30 мая были автоматически обнаружены с определением места прототипом Международного центра данных (МЦД) в течение часа без сортировки автоматическим процессом МЦД. Сейсмические данные были обнаружены 62 станциями, использованными для прототипа МЦД, включая региональную станцию в Нилоре, Пакистан.<sup>60</sup> Восемь региональных станций в сформированной сети МСМ, как ожидается, будут способны обнаружить события такого типа с порогом до  $2.5 m_b$ . Испытательные площадки для событий 11 и 28 мая были четко засечены фотоснимками с коммерческого спутника, имеющего разрешение 5 м, путем сравнения изображений, полученных до или после испытания. Сейсмический сигнал от события 11 мая имел отношение сиг-

нал/шум более 1000 в Нилоре. Мощности многих взрывов (произошедших, возможно, на расстоянии 1 км друг от друга) составили около четверти от заявленных Индией и Пакистаном значений. Так, мощность индийского испытания 11 мая была оценена в 12 кт вместо 55 кт (9-16 кт при доверительности 90 %,  $m_b$  5.0), для индийского события 13 мая ( $m_b < 2.5$ ) мощность была понижена от 0.8 кт до 0.03 кт<sup>61</sup>, для пакистанского события 28 мая мощность снижена от 30-35 кт до 9 кт (6-13 кт,  $m_b$  4,9), а событие 30 мая, для которого мощность не была заявлена, оценено в 4 кт (2 – 8 кт,  $m_b$  4,3). Понижение мощности при оценке ослабило утверждения Индии о значительном термоядерном оружии.

### **Северокорейское испытание 9 октября 2006 г.**

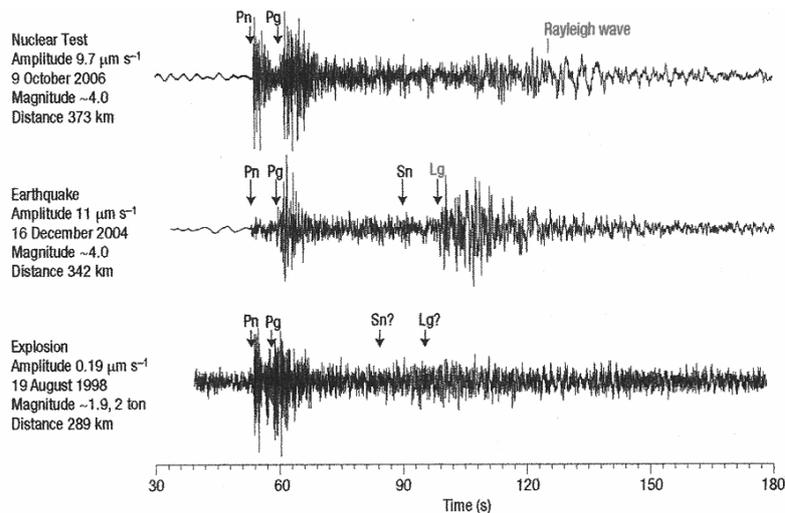
Испытание мощностью 0.6 кт, проведенное Северной Кореей, было быстро обнаружено и отождествлено сейсмическими станциями в Австралии, Европе, Северной Америке и Азии<sup>62</sup>. Свыше 20 станций МСМ зафиксировали взрыв. Геологической службе США потребовалось пять часов для определения места испытания. На Рис. 9 приведены спектры двух событий с магнитудой 4 – это октябрьский взрыв, произведенный на расстоянии 373 км, и землетрясение, которое произошло на расстоянии 342 км. Октябрьский сигнал был отождествлен со взрывом из-за большой амплитуды Р- волны (волны давления) и слабой амплитуды S- волны (сдвиговой волны) при сравнении с малой амплитудой Р-волны у землетрясения. Региональные сейсмические данные были получены китайско-американской действующей станцией, не входящей в МСМ, в Муданджане, Китай. Это показывает, что мониторинг ДВЗЯИ улучшается от привлечения соседних станций.

Поскольку это было первое испытание, не удивительно, что удалось обнаружить радиоактивный газ ксенон Управление по связи с общественностью при директоре Национальной разведывательной службы США объявило, что «радиоактивные осадки» были обнаружены через два дня после испытания. Станция МСМ в Йеллоу Найф (Канада) зафиксировала повышенные уровни Хе-133 через 12 дней позже, Это послужило доказательством, что событие было ядерным взрывом. Высокое отношение сигнал/шум указывало, что уровень порога обнаружения много меньше значения 0.6 кт. Данные от четырех подземных химических взрывов в 1998 г., проведенных на расстоянии 289 км, были использованы Ричардсом и Кимом для определения уровня порога в 0.002 кт для этого региона, что в 50 раз меньше порога НАМ в 0.1 кт.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЯ О ПРОГРЕССЕ МОНИТОРИНГА С 1999 ГОДА**

В начале 90-х годов прошлого века ожидалось, что мониторинг ДВЗЯИ будет иметь порог в 1 кт, но технические успехи понизили этот ожидаемый порог до 0.1 кт, а в некоторых регионах до еще меньшей величины.. Понижение порога неудивительно, поскольку такая тенденция предсказывалась в более ранних исследованиях по мере улучшения техники и анализов, а также повышения доступа в различные районы. Результаты Национальной академии наук США (НАН) были основаны на телесеismicком и региональном мониторинге с дополнительными возможностями от сейсмических решеток. Успехи мониторинга ДВЗЯИ, начиная с 1999 года, приведены ниже.

Исследование ДВЗЯИ, проведенное НАН и обсуждавшееся ранее, привело к выводу, что полностью завершенная МСМ сможет надежно определять и отождествлять *подземные ядерные взрывы* до 0.1 кт в скалистых породах в любом месте Азии, Европы, Северной Африки и Северной Америки. Для большей части Азии, Европы и Северной Африки порог детектирования лежит в диапазоне 0.03-0.06 кт для скалистых пород, а в некоторых местах он снижается до 0.01 кт при использовании сейсмических решеток и методов региональной сейсмологии. Взрыв внутри *полости* с мощностью выше 1-2 кт не может быть надежно скрыт и мог бы оказаться скрытым только с большой трудностью.



**Рис. 9:** Северокорейское испытание 2006 г., землетрясение и химический взрыв. Сейсмограммы с вертикальной скоростью грунта (мкм/сек), записанные в Муданьцзяне, Китай, относятся (сверху) к северокорейскому испытанию 9 октября 2006 г. с магнитудой 4, на расстоянии 373 км, при мощности 0.7 кт; (в центре) к землетрясению 16 декабря 2004 г. с магнитудой 4, на расстоянии 342 км; (снизу) к небольшому химическому подземному взрыву 19 августа 1998 г. с магнитудой 1.9, на расстоянии 289 км, при мощности 2 т. Большая амплитуда Р-волны на сейсмограмме 9 октября 2006 г. говорит о том, что событие было подземным взрывом. Форма волны при небольшом химическом взрыве имеет такую же структуру, что и от подземного ядерного испытания (P. Richards and W. Y. Kim, 2007).

*Атмосферные ядерные взрывы* могут быть обнаружены и отождествлены при мощностях выше 0.5 – 1 кт.

*Подводные ядерные взрывы* в океанах можно фиксировать и идентифицировать до порога 0.001 кт или ниже.

Ядерные взрывы в *верхней атмосфере* и *ближнем космосе* могут быть обнаружены и отождествлены с мощностью выше 1 кт на расстояниях до 100 миллионов км от Земли.

Решетки сейсмографов (смотрите раздел *Сейсмические решетки*) могут обнаруживать и отождествлять события с порогами 2-2.5  $m_b$  на расстояниях свыше 2000 км, что соответствует мощностям менее 0.01 кт для взрывов плотной среде и менее 1 кт для взрывов в большой полости.

Региональный мониторинг с рассмотрением  $P_n$ - волн,  $L_g$  – волн и коды (смотрите раздел *Мониторинг с использованием региональной сейсмологии*) оставляет благоприятное впечатление. Региональные спектры содержат гораздо больше информации, чем узкополосные магнитуды. Новые алгоритмы, более близкий доступ и сейсмические модели повышают способности к дискриминации между сейсмическими источниками и улучшают оценки положения событий с магнитудой меньше 3.5  $m_b$ . Когда были использованы старые советские данные, полученные в 500-1000 км от Семипалатинского полигона, были обнаружены почти все (за исключением двух) события с мощностью выше 0.001 кт. Региональные сейсмические данные, полученные вблизи Северной Кореи, показывают, что регионально-сейсмический порог для этого региона составляет 0.002 кт.

Дальнейшие выводы таковы:

- Сейсмические пороги могут быть понижены на 0.25-0.5  $m_b$ , если 120 вспомогательных станций МСМ (смотрите *Международную систему мониторинга*) работают и анализируют *почти в реальном времени*<sup>63</sup>. Дополнительные основные станции могут стать станциями с решетками.
- МСМ может делиться данными с Глобальной сейсмической сетью и с другими заинтересованными сейсмическими станциями (дальнейшее обсуждение смотрите в *Международной системе мониторинга*), что увеличивает доступную информацию от закрытых мест и улучшает анализы ДВЗЯИ с дополнительными сейсмическими экспертами.
- Корреляционное детектирование (смотрите *Сейсмические решетки*) может понизить

пороги на 0.5-1.0  $m_b$ . Такой подход особенно полезен для бывших полигонов и расширяется на данные о землетрясениях, подобных событию 1997 года в Карском море. Потребуется десятилетие для гораздо более широкого воплощения этого подхода.

- Взаимная корреляция (смотрите *Сейсмические решетки*) формы сейсмических волн может уменьшить неопределенности в определении положения для сейсмически активных регионов в 10-100 раз по сравнению с оценками, которые основаны на временах прибытия сейсмических волн. Дополнительные работы в течение следующего десятилетия обогатят этот подход.
- Обнаружение радионуклидов (смотрите *Радионуклидный мониторинг*) на порядок величины оказалось лучше, чем ожидалось, при использовании приборов АПАРК и ПАРА.
- Интерферометрический радар с синтезированной апертурой (смотрите соответствующий раздел) может при некоторых условиях измерять осаднение почвы после ядерного испытания с точностью 0.2-0.5 см и определять положение события с точностью 100 м. ИнРСА может дискриминировать землетрясения и взрывы на основе симметрии картины осаднения. Порог детектирования при помощи ИнРСА меньше 1 кт для глубины взрыва 500 м, если имеются данные РСА, полученные до взрыва. Без такой информации порог ИнРСА составит более 20 кт. ИнРСА и РСА могут следить за деятельностью испытательных ядерных полигонов. Сейсмические данные можно использовать для прямых измерений ИнРСА.
- Совместный мониторинг (смотрите *Совместный мониторинг на полигонах*) рядом с полигонами может обнаружить мощности менее 10 кг путем использования датчиков пассивной сеймики, а также инфразвуковых датчиков, видео-датчиков и датчиков ЭМИ, Помещенные в двух метрах от экспериментов дозиметры смогут обнаружить мощности деления и синтеза менее одного грамм-эквивалента без раскрытия ядерных секретов.
- Полеты по программе «Открытое небо» можно расширить на большее число стран, чтобы увеличить их возможности более полного участия.

## ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. D. Hafemeister, "Effective Verifiability of the CTBT," направлено в Arms Control Today.
2. National Academy of Sciences, *Technical Issues Related to the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty* (Washington, National Academy Press, 2002), состав рабочей группы: Дж.Холдрен (председатель), Х.Агню, Р.Гарвин, Р.Джинлос, С.Кини, К.Ларсон, А.Нарат, В.Пановский, П.Ричардс, С.Сак, А.Трайвелпис и сотрудники НАН Дж.Хазбенд и Д.Хефмейстер.
3. *SRR, Proceedings of the Annual Seismic Research Review; Ground-based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*, SRR-27 (LA-UR-05-6407, 2005), SRR-28 (LA-UR-06-5471, 2006), (Los Alamos: NNSA/AFTAC). Кроме того, <https://www.nemre.nnsa.doe.gov/egibin/prod/researchreview/index.egi>, [www.monitoring.llnl.gov](http://www.monitoring.llnl.gov), [www.ees.lanl.gov](http://www.ees.lanl.gov) Bulletin of the Seismological Society of America, <http://www.seismosoc.org/meetings/> meetings.html. *Pure and Applied Geophysics* 158 (2001): (1-2) Source Location; (7) Regional Waves Propagation and Crustal Structure; (8) Surface Waves; (11) Source Processes and Explosion Yield Estimates. Там же. 159 (2002): (4) Seismic Event Discrimination and Identification; (5-6) Data Processing and Infrasound. E. Husebye and A. Dainty, ed., *Monitoring of Comprehensive Test Ban Treaty* (Boston: Kluwer Academic, 1995). Office of Technology Assessment, *Seismic Verification of Nuclear Testing Treaties and The Containment of Underground Nuclear Explosions* (Washington, OTA, 1988, 1989).
4. National Research Council, *Research Required in Support CTBT Monitoring* (Washington, NRC, 1997): 14-15. Приведены значения магнитуд для испытаний с мощностью 1 кт и 150 кт на ряде бывших полигонов: Невада (3.87, 5.74), Семипалатинск (4.45, 6.12), Новая Земля (4.32, 5.97), Лоб Нор (4.3, 5.93), Муруоа (4.5, 6.04).
5. L. R. Sykes, Four Decades of Progress in Seismic Identification Help Verify the CTBT, *EOS Transactions of the American Geophysical Union* 83 (29 October 2002): 497-500.
6. M. Fish, D. Jepsen, and J. R. Murphy, "Experimental Seismic Event-screening Criteria at the Prototype International Data Center", *Pure and Applied Geophysics* 159 (2002): 845-888. Существует возрастание в 0.4  $m_b$  для землетрясений (но не для взрывов) между данными Национального Информационного центра США по землетрясениям (НИЦЗ) и Временным международным информационным центром Организации ДВЗЯИ (ВМИЦ):  $m_b(\text{НИЦЗ}) = m_b(\text{ВМИЦ}) + 0.4$  и  $MS(\text{НИЦЗ}) = MS(\text{ВМИЦ}) + 0.1$ . Поскольку нет возрастания для взрывов, это приводит

- к очень незначительному влиянию на оценки НАН по мощности взрывов. J. P. Granville, P. G. Richards, W. Kim, and L. R. Sykes, "Understanding the Differences between Three Teleseismic mb Scales", *Bulletin of the Seismological Society of America* 95 (5) (2005): 1809-1824.
7. L. Sykes and J. Evernden, "Verification of a Comprehensive Test Ban Treaty", *Scientific American* 247 (October 1982): 47-55.
8. L. Sykes, J. Evernden, and J. Cifuentes, "Seismic Methods for Verifying Nuclear Test Bans". *Amer. Instit. Physics Conf. Series* 104 (1983), ed. D. W. Hafemeister and D. Schroerer : 85-133.
9. J. F. Evernden and C. B. Archambeau, "Some Seismological Aspects of Monitoring a CTBT", *Arms Control Verification* (Washington: Pergamon, 1986). ed. K.Tsipis. D. Hafemeister, and P. Janeway: 223-263.
10. W. J. Hannon, "In-country Seismic Stations for Monitoring Nuclear Test Bans", *Nuclear Weapon Tests*, ed. J. Goldblat and D. Cox (Oxford Univ. Press, 1988): 191-207. W. J. Hannon, "Seismic Verification of a Comprehensive Test Ban", *Science* 227 (1985): 251 – 257.
11. Office of Technology Assessment, *Seismic Verification of Nuclear Testing Treaties* (Washington, OTA, 1988).
12. J. P. Claassen, J. Unger, and W. Leith, "Performance Estimates of a Global Network of Open Stations", *IRIS Newsletter* 12 (3) (Washington, Incorporated Research Institution for Seismology, 1993): 1-3, 7.
13. CTBT; Annual Report 2006 (Vienna: CTBTO, 2007): 37.
14. Там же.
15. Приложение 2 к Протоколу: Для событий, обнаруженных сейсмическим компонентом МСМ, могут быть использованы среди других следующие параметры: место обнаружения; глубина события; отношение магнитуд поверхностных и объемных волн; содержимое частотного сигнала; спектральные составляющие фаз; спектральная деформация; первое движение Р-волны; фокальный механизм; относительное возбуждение сейсмических фаз; сравнения с другими событиями, а также группы событий и региональные дискриминанты в случае применимости.
16. J. R. Murphy, "Initial Development of the IDC MS/mb Event Screening Criteria, IDC Technical Meeting on Event Screening" (Arlington, VA: SAIC Corp., October 2005). Новая калибровка событий дает  $MS = 1.25mb - 3.0$  для полигона в Неваде и  $MS = 1.25 mb - 3.50$  для Семипалатинского полигона.
17. J. R. Murphy et al., "Calibration of IMS stations in Central and Eastern Asia for Improved Seismic Event Location", *Bull. Seismological Society America* 95 (4), (2005): 1535-1560. O.Meier, "Hard Cases Stymie Test Ban Treaty", *Arms Control Today* 35 (November 2005): 30-32.
18. R. Butler et al., "The Global Seismographic Network Surpasses Its Design Goal," *EOS* 85 (June 2004):225-229. *Global Seismographic Network* (IRIS July 2005).
19. T. Lay et al., "Global Seismic Network Design Goals Update 2002" (IRIS August 26, 2002).
20. K. Aki and P. Richards, *Quantitative Seismology* (Sausalito, CA: University Science Books, 2002): 647
21. V. Khalturin, T. Rautian, and P. Richards, "A Study of Small Magnitude Seismic Events during 1961-1989 On and Near the Semipalatinsk Test Site, Kazakhstan," *Pure and Applied Geophysics* 158 (2001):143-171. См. также [2]: 39.
22. E. Husebye and A. Dainty, ed., *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty* (Boston: Kluwer Academic, 1995). Also *SRR-27*.
23. J. R. Murphy and B. W. Barker, "Application of Network-averaged Teleseismic P-Wave Spectra to Seismic Yield Estimation of Underground Nuclear Explosions," *Pure and Applied Geophysics* 158 (2001):2123-2171.
24. M. Fisk, T. Lay, and S. Taylor, "Modeling and Empirical Research on Energy Partitioning of Regional Seismic Phases used for Explosion Monitoring," *SSR-27*: 539-549, and *SSR-28*: 580-589.
25. D. F. Harris, "Ground Truth Collection for Mining Explosions in Northern Fennoscandia and Northwestern Russia," *SRR-27*: 31-41.
26. K. Mayeda et al., "Stable and Transportable Regional Magnitudes Based on Coda-Derived Moment-Rate Spectra," *Bull. Seismological Soc. America* 93 (2003): 224-239, W. S. Phillips et al., "Calibration for Coda-Based Magnitude and Yield," *SRR-26* (2004): 449-456.
27. I. Tibuleac et al., "Predicting Explosion Generated Sn and Lg Coda Using Synthetic Seismograms," *SRR-27*: 214-221.

28. H. T. Bungun et al., "Energy Partitioning for Seismic Events in Fennoscandia and NW Russia," *SRR-27*: 529-538
29. См. [24], первая ссылка.
30. *Surface wave models*: M. Pasyanos, W. Walter, and S. Hazler, "A Surface Wave Dispersion Study of the Middle East and North Africa for Monitoring the CTBT," *J. Pure & Applied Geophysics* 158 (2001): 1445-1474, M. Pasyanos et al., "Geophysical Model Applications for Monitoring," *SRR-27*: 142-151, W. Rodi and D. Reiter, "Development of a Joint Regional and Surface Waves Tomography Method," *SRR-27*: 178-188, van der Lee et al., "Towards a Comprehensive Seismic Velocity Model for the Broader Africa-Eurasia Collision Region to Improve Nuclear Explosion Monitoring," *SRR-27*: 232-241, M. Pasyanos et al., "The Use of Geophysical Models for Nuclear Explosion Monitoring," *SRR-28*: 176-185, а также [29].
31. P. G. Richards et al., "The Applicability of Modern Methods of Earthquake Location," *Pure and Applied Geophysics* 163 (2006): 351-372.
32. F. Ringdal et al., "Research in Regional Seismic Monitoring," *SRR-27*: 423-432 and "Adaptive Waveform Correlation Detectors for Arrays," *SRR-28*: 444-454.
33. F. Ringdal, S. Gibbons, and D. Harris, "Adaptive Waveform Correlation Detectors for Arrays: Algorithms for Autonomous Calibration," *SRR-27*: 413-422.
34. *Pure and Applied Geophysics* 159 (5-6) (2002): Data Processing and Infrasound, N. Brachet and J. Coyne, "Current Status of Infrasound Data Processing at the International Data Centre," *SRR-28*: 873-881
35. F. Ringdal et al., "Basic Research on Seismic and Infrasonic Monitoring of the European Arctic," *SRR-28*: 1017-1027.
36. D. R. Christie, B. L. Kennett, and C. Tarlowky, "Detection of Regional and Distant Atmospheric Explosions at IMS Infrasound Stations," *SRR-27*: 817-827.
37. H. F. Bass and F. D. Shields, "The Use of Arrays of Electronic Sensors to Separate Infrasound from Wind Noise," *SRR-26*: 601-607.
38. M. A. Zumberge et al., "An Optical Fiber Infrasound Sensor: A New Lower Limit on Atmospheric Pressure between 1 and 10 Hz," *J. Acoustical Society* 113 (2003): 2474-2479. K. Walker, M. A. Zumberge, J. Berger, and M. Hedlin, "An Improved Method for Determining Infrasound Back Azimuth with Optical Fiber Sensors," *SRR-27*: 855-865, and "Determining Infrasound Pulse Velocity Direction with a Three-Arm OFIS," *SRR-28*: 947-956.
39. *Pure and Applied Geophysics* 159 (3) (2001): Hydroacoustic. F. Graeber, J. Coyne, and E. Tomuts, "The Current Status of Hydroacoustic Data Processing at the International Data Centre," *SRR-28*: 717-724.
40. См. [2]: 52.
41. Горизонтальная энергия океанских волн (Т-фаза) связана с движением почвы островов, которое измеряется сейсмически.
42. J. J. Pulli and Z. M. Upton, "Azimuthal Dependence on Hydroacoustic Blockage at Diego Garcia and Implications for Discrimination," *SRR-27*: 740-748.
43. E. Matzel, A. Ramirez, and P. E. Harben, "Model-Based Hydroacoustic Blockage Assessment and Development of an Explosive Database," *SRR-27*: 733-739.
44. См. [2]: 53.
45. T. W. Bowyer et al., "Field Testing of Collection and Measurement of Radioxenon for the Comprehensive Test Ban Treaty," *J. Radioanalytical Nuclear Chemistry* 240 (1) (1999): 109-122. Эффект вырос при использовании схемы запаздывающих совпадений для конверсионных электронов.
46. S. R. Biegalski and O. A. Ezekoye, "Design of Aerosol Sampler to Remove Radon and Thorium Progeny Interference from Aerosol Samples for Nuclear Explosion Monitoring," *SRR-27*: 761-769.
47. Ли Бин, «Анализ продуктов деления. Метод верификации ДВЗЯИ при инспекции на месте», *Наука и всеобщая безопасность* 7(2) (1998):
48. P. Vincent et al., "New Signatures of Underground Nuclear Tests Revealed by Satellite Radar Interferometry," *Geophysical Research Letters* 30 (2003): 2141-2145. S. M. Buckley, P. Vincent, and K. Gudipati, "Next Generation InSAR Ground-Truth Data and Techniques," *SRR-2004* (2004): 247-256. S. M. Buckley, P. Vincent, and D. Yang, "New Ground-Truth Capability from InSAR Time Series Analysis," *SRR-2005* (2005): 898-906.

49. SAR Data from McDonald, Dettweiler & Associates (gs.mdacorporation.com/products/sensor/radarsat), software from PCI Geomatics ([www.pcigeomatics.com](http://www.pcigeomatics.com)).
50. D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth Surface," *Review of Geophysics* 36 (4) (1998):441-500. P. A. Rosen et al., "Synthetic Aperture Interferometry," *Proceedings of the IEEE* 88 (3), (2000): 333-382.
51. *Large-Scale, Open-Air Explosive Detonation, Divine Strake, at the Nevada Test Site* (DOE/EA-1550, November 2005): 1-8.
52. G. Rennie, "Monitoring Earth's Subsidence from Space," *Science and Technology Review* (LLNL, April 2005): 4-11.
53. CTBT-Negotiator S. J. Ledogar, *SFRC* (1999): 16.
54. С.Джонс и Ф. фон Хиппель, «Измерения подкритических экспериментов в рамках ДВЗЯИ», *Наука и всеобщая безопасность* 6 (2) (1997):
55. S. Drell et al., *Subcritical Experiments* (McLean, VA: JASON, Mitre Corp., 1997).
56. J. Zucca et al. "Signatures of Testing: On-Site Inspection Technologies," in *Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*:123-124.
57. Там же:: 126.
58. P. R. Richards and W. Y. Kim, "Testing the Nuclear Test-Ban Treaty," *Nature* 389 (October 23, 1997): 781-782. G. van der Vink et al., "False Accusations, Undetected Tests and Implications for the CTB Treaty," *Arms Control Today* 28 (May 1998):7-13
59. F. Ringdal et al., "Research in Regional Seismic Monitoring," *SRR-2005*: 423-432.
60. B. Barker et al., "Monitoring Nuclear Tests," *Science* 281 (25 September 1998): 1967-1968.
61. Мощность 0.03 кт – это верхний предел из-за отсутствия какого-либо сигнала в Нилоре 13 мая; приведенная величина представляет собой порог обнаружения в Нилоре на 13 мая.
62. P. Richards and W. Kim, "Seismic Signature," *Nature Physics* 3 (January 2007): 4-6. R. L. Garwin and F. N. von Hippel, "Deconstructing North Korea's October 9 Nuclear Test," *Arms Control Today* 38 (November 2006): 14-16. W. Y. Kim and P. Richards, "North Korean Nuclear Test: Seismic Discrimination at Low Yield." *EOS* 88 (April 3, 2007):157-161.
63. См. [2]: 49.