

Советско-американский проект по мониторингу подземных ядерных испытаний:
научные, социальные и политические аспекты

А. А. Амрамина^{1,2}, В. А. Пилипенко^{1,3}

¹ Институт физики Земли РАН, Москва

² Университет Миннесоты, Миннеаполис

³ Геофизический Центр РАН, Москва

pilipenko_va@mail.ru

Получено 11 мая 2018 г.; принято 13 июля 2018 г.; опубликовано 25 июля 2018 г.

Аннотация

Работа описывает историю одной из ярких страниц отечественной геофизики – советско–американский проект по контролю подземных ядерных взрывов. Недостаточная надежность методов контроля ядерных испытаний на протяжении многих лет оставалась предметом споров, поводом для взаимного недоверия и предлогом для затягивания переговоров о запрещении ядерных испытаний между США и СССР во время холодной войны. В совместном проекте, инициированном и осуществленном советскими и американскими геофизиками в 1986–1989 гг., методы сейсмического мониторинга были использованы для верификации единственного разрешенного на тот момент вида ядерных испытаний – под землей. В ходе этого проекта проведена серия экспериментов с калибровочными химическими взрывами, которые регистрировались на высокочастотных сейсмических станциях, развернутых в районах семипалатинского и невадского полигонов. В результате, было доказано, что подземные взрывы поддаются обнаружению, их координаты и мощность определены. Успешная демонстрация научному сообществу, военным ведомствам и правительствам обеих стран эффективности научно-технических методов взаимного контроля подземных испытаний и заключение об ошибочности приписываемых СССР превышений порога мощности испытаний сдвинули переговоры с мертвой точки. Эти события явились примером того, что международное научное сообщество и негосударственные организации способны воздействовать на международный политический климат, и добиться того, чего не могут сделать политики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подземные ядерные испытания, холодная война, верификация, сейсмические методы, ИФЗ РАН, контроль ядерных испытаний

Введение

28 мая 1986 г. в Москве директор американской негосударственной организации Совет по защите природных ресурсов NRDC (Natural Resources

Defense Council) Э. ДеВинд подписал соглашение с Академией Наук СССР, представляемой ее вице-президентом Е. П. Велиховым, об установке трех американских сейсмических станций для мониторинга подземных ядерных взрывов (ПЯВ) вблизи основного советского ядерного полигона в Семипалатинске (Казахстан) [Cochran, 1987]. Одновременно стороны пришли к соглашению о размещении советских сейсмических станций вблизи американского ядерного полигона в штате Невада. Это скромное соглашение, заключенное не на правительственном уровне и подразумевавшее лишь научно-техническое сотрудничество, фактически открыло недоступное до того времени направление в советско-американском диалоге о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Прецедент прямого обмена информацией о результатах сейсмического мониторинга ПЯВ, убедительные возможности взаимного контроля, экспертное мнение ученых с обеих сторон – все это было предложено впервые во время описываемого проекта и дало толчок для целой череды подобных совместных экспериментов и снятию напряженности в вопросах ядерных испытаний между СССР (а позднее – Российской Федерацией) и США.

В данной статье, основанной на публикациях того времени, научно-технических отчетах, и интервью с участниками эксперимента, показано, как сейсмологи оказались на передовой линии международной политики. История этого эксперимента – пример того, как в некоторых ситуациях критическая масса научных знаний способна перевесить политическое давление на международном уровне, и как в случае глобальной угрозы ученые могут аккумулировать общественную энергию и превратиться в стратегическую силу. Наша попытка взглянуть на международные сейсмологические исследования в рамках ограничения ядерных вооружений в конце холодной войны сквозь призму совместных советско-американских экспериментов по верификации ПЯВ преследует цель отдать им должное как одной из предложенных учеными независимых исследовательских инициатив, которая повлияла на политические решения на самом высоком уровне.

Политический фон

В 1963 г. после многолетних переговоров США, Великобритания и СССР подписали Договор о частичном прекращении ядерных испытаний, по которому испытания запрещалось проводить в атмосфере, под водой и в космосе, но не под землей. В военных ведомствах США и СССР считали, что возможности сейсмического мониторинга ПЯВ недостаточно развиты для того, чтобы надежно фиксировать небольшие подземные взрывы как в США, так и в Советском Союзе, а это позволит другой стороне продолжать разработку и испытания новых видов ядерного оружия. После подписания этого договора вопрос об ограничении ядерных испытаний отошел на задний план, и интерес к нему вновь появился лишь в последние дни президентского правления Р. Никсона.

В 1974 г., когда Уотергейтский скандал подходил к развязке, президент Р. Никсон встретился с генеральным секретарем ЦК КПСС Л. Брежневым в Москве. Для придания значимости этой встрече в верхах Р. Никсону нужен был договор о взаимном контроле вооружений. После нескольких дней переговоров стороны пришли к соглашению о запрещении ПЯВ, превышающих 150 кт в тротиловом эквиваленте (для сравнения, мощность бомбы, сброшенной на Хиросиму, составляла 15 кт), подписав Договор о пороговом ограничении подземных испытаний ядерного оружия. Два года спустя, уже при президенте

Дж. Форде, стороны пересмотрели этот документ, включив в него ядерные взрывы в мирных целях, и заключили Договор об ограничении мирных ядерных взрывов. Американская сторона не ратифицировала эти соглашения еще долгих 16 лет, выдвигая обвинения в предполагаемых нарушениях СССР порога мощности взрывов. К сожалению, и этому этапу международного диалога о прекращении ядерных испытаний не удалось положить конец ни самим испытаниям, ни атмосфере недоверия между двумя мировыми державами [Beardsley, 1985]. В течение следующего десятилетия правительство США демонстрировало явное нежелание отказываться от тестирования своего ядерного потенциала, а действия Советского Союза в этой сфере отражали, скорее, его политические приоритеты в противостоянии США, чем стремление к спасению планеты от ядерной угрозы [Morrison, 1987].

Дальнейшие переговоры о полном запрещении ядерных испытаний прервались при администрации Дж. Картера в связи с вводом советских войск в Афганистан в 1979 г. Но и впоследствии администрация Р. Рейгана категорически отказывалась возобновлять переговоры по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний СТБТ (Comprehensive Test Ban Treaty). В качестве причины снова называлась необходимость дальнейших испытаний, отсутствие надежных методов их верификации, и якобы неоднократные нарушения СССР порога в 150 кт, установленного пороговыми договорами [Даффи и Лукьянцев, 1991]. Администрация Р. Рейгана, настроенная на продолжение испытаний, воспользовалась задержкой ратификации договоров 1974 и 1976 гг. со своей стороны как предлогом, объявив ее препятствием для подписания соглашения, запрещающего любые ядерные испытания. Утверждения о нарушении СССР соглашений о 150-кт пороге мощности неоднократно повторялись администрацией США в последующие годы.

В 1985 г. СССР объявил односторонний мораторий на ядерные испытания и М. Горбачев делал попытки убедить Р. Рейгана присоединиться к этому мораторию. Для М. Горбачева реализация совместного проекта АН СССР и американской общественной организации NRDC представляла собой возможность продемонстрировать американским властям, что новое советское руководство настроено серьезно относительно контроля вооружений [Barth, 2006]. Усилия эти не приносили заметных результатов, пока 26 апреля 1986 г. не произошло событие, прямо и косвенно оказавшее переломное воздействие на ход дел в вопросах ядерных испытаний. Чернобыльская авария потрясла мировую общественность, неожиданно и страшно продемонстрировав всю опасность неконтролируемой ядерной энергии. Она произвела отрезвляющий эффект даже на тех, кто сомневался в искренности стремлений лидера Советского Союза прекратить ядерные испытания – на фоне катастрофы они звучали куда убедительней. На встрече в Рейкьявике в октябре того же года Р. Рейган признал эти намерения серьезными, но вновь отказался присоединиться к мораторию [Evangelista, 1999].

По мнению администрации Р. Рейгана, прогресс переговоров о запрещении ядерных испытаний тормозился многолетним сопротивлением советских властей требованиям США о проведении «инспекций на местах». Но согласились ли бы США, в свою очередь, допустить советские инспекции на свои полигоны? Не использовали ли они этот аргумент как уловку для замедления переговоров, не давали ли они себе передышку и возможность продолжать испытания в целях развития ядерного оружия? Из утомительного замкнутого круга бесконечных пререканий ситуацию вывели описываемые совместные советско-американские

эксперименты. Эксперименты по верификации ПЯВ, проведенные в 1986–1988 гг. в Семипалатинске и Неваде советскими и американскими геофизиками, были первым совместным начинанием между СССР и США в столь оборончувствительной области, принесшим как научные, так и политические результаты.

Необходимо указать также на специфику обеспечения работ по проведению и контролю подземных ядерных испытаний. В США заказчиком этих работ было Министерство обороны (Пентагон) и Министерство энергетики. К выполнению работ привлекались такие организации как Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), Геологическая служба США USGS (United States Geological Survey), ряд университетов и научных центров. И заказчики, и исполнители, заинтересованные в продолжении и развитии этих работ, настойчиво убеждали в невозможности полноценного контроля ПЯВ правительство США, которое, впрочем, и само не стремилось к открытому взаимному контролю ядерных испытаний [Von Hippel, 2013]. Ливерморская и Лос-Аламоская национальные лаборатории активно разрабатывали качественно новые типы оружия – рентгеновские и гамма лазеры с ядерной накачкой, генераторы пучков частиц и электромагнитного импульса, и ядерные испытания в шахтах Невады были важной частью этих работ.

В СССР головным ведомством по контролю за ПЯВ было Министерство обороны (МО) СССР и его Служба специального контроля (ССК). Основным исполнителем работ по созданию необходимых технических средств и оборудования было Министерство среднего машиностроения. Научное сопровождение этих работ осуществлял Специальный сектор Института физики Земли АН СССР под руководством академика М. А. Садовского. В середине 80-х годов происходило переоснащение сети станций ССК новым оборудованием и средствами сбора информации. И МО СССР, и Минсредмаш были на тот момент против заключения соглашений с США о контроле ПЯВ. Важность советско-американских экспериментов состоит именно в том, что, несмотря на жесткость властных структур и подконтрольных им государственных институтов обеих стран, ученым удалось наладить прямой обмен данными между США и СССР о проводимых испытаниях.

В чем камень преткновения?

С политической стороны для американских сторонников продолжения ядерных испытаний проблема верификации представляла сильный и очень удобный аргумент против их запрещения. Они утверждали, что соглашение о запрещении испытаний без адекватных методов контроля было бы не в американских интересах, поскольку тогда США никогда не могли быть уверены, что Советский Союз не продолжит испытывать ядерное оружие тайком, повышая качество своего ядерного потенциала и обретая возможность изменить баланс сил. Сторонники же запрещения испытаний, напротив, подчеркивали, что у гонки вооружений есть лишь один возможный исход. По их мнению, верификация была вполне осуществима, а дальнейшие испытания безопасности и надежности боеголовок нецелесообразны. Некоторые сейсмологи даже оспаривали официальные правительственные заявления о том, что тогдашняя сейсмология не позволяла создать пригодную систему мониторинга [Evernden, 1988].

В это время обеими сторонами уже активно использовались сейсмические методы. Существовавшая в то время сейсмическая сеть МО СССР была способна регистрировать взрывы на Невадском полигоне с точностью $\sim 20\%$ для зарядов с мощностью >1 кТ. Западные страны с 1968 г. контролировали ПЯВ на Новой Земле и Семипалатинске по данным высокочастотных сейсмических сетей NORSAR и NORESS в Норвегии [Richards and Zavales, 1990].

Верификация ПЯВ действительно сталкивается с рядом сложных технических проблем [Evernden et al., 1986]. Система контроля должна уверенно регистрировать и идентифицировать даже слабые события с эффективной сейсмической магнитудой начиная с $M \sim 2.5$. При этом только в США в течение одного дня при строительстве и горных разработках происходит $\sim 10^4$ взрывов с эффективной мощностью от 50 т. При наличии мировой сети высокочувствительных сейсмометров никакой взрыв, даже слабой мощности, не пройдет незамеченным. Отдельная сейсмостанция с диапазоном регистрируемых частот 1–10 Гц может регистрировать подземные взрывы мощностью >10 т на расстояниях до 2–3 тыс. км. Определение мощности взрыва является гораздо более сложной задачей. Для неспециалиста даже сейсмограммы землетрясения и взрыва выглядят неразличимыми, поэтому уверенное определение типа источника и его мощности основано на тонких методах анализа сейсмических сигналов. Различать землетрясения, ядерные взрывы, и промышленные взрывы можно по данным широкополосной сейсмической аппаратуры по совокупности критериев: различие между эффективностью возбуждения объемных и поверхностных волн, глубине источника, и спектральном составе излучений. Этот спектральный состав может сильно искажаться в ближней зоне в зависимости от свойств среды.

Возражения против запрета ядерных испытаний опирались на следующие технические проблемы:

- *Сомнительная надежность сейсмических методов контроля.* Для эффективного контроля подземных ядерных взрывов необходима сеть высокочувствительных сейсмических станций, способная регистрировать даже слабые сейсмические события с $M > 2.5$ на удалениях несколько тысяч км. Некоторые эксперты утверждали, что сейсмическая аппаратура того времени не способна выполнить такую задачу. Более того, они высказывали сомнение, что удастся уверенно различать слабые землетрясения, промышленные взрывы и подземные испытания. Администрация Р. Рейгана активно продвигала метод контроля CORRTX, для которого требуется установка гидродинамической трубы поблизости (на удалениях до сотен метров) от места взрыва. Однако даже среди американских сейсмологов многие оспаривали такие представления [Sykes, 1987]. Большинство специалистов были убеждены в преимуществе сейсмических методов над методом CORRTX, т.к. последний неэффективен для слабых взрывов с мощностью < 75 кТ и имеет значительную неопределенность в зависимости от геометрии установки [Evernden, 1985].

- *Намеренное нарушение СССР 150 кт порога по мощности.* Чиновники США, опираясь на мнение некоторых сейсмологов, сравнивавших интенсивности сейсмических волн от ПЯВ на полигонах в Неваде и Семипалатинске, утверждали, что мощность советских взрывов превышает установленный порог. Так согласно оценкам Alewine and Bache [1983] СССР несколько раз превышал порог в 150 кТ. В основном эту точку зрения выражали ученые, связанные с государственными структурами (например D. Kerr – директор Los Alamos National Laboratory).

В то же время, известные американские сейсмологи Л. Сайкс (L. Sykes), Дж. Эвернден (J. Evernden), и др. доказывали, что учет существенно различного затухания объемных волн в земной коре в районе Семипалатинска и Невады показывает, что 150-кт порог никогда не превышался при ПЯВ в Семипалатинске [Evernden and Marsh, 1987]. Наличие широкого диапазона мнений среди профессиональных сейсмологов позволяло администрации Р. Рейгана выбирать наиболее удобную на текущий момент точку зрения. Забавно, что в этот период все статьи в западных журналах, поступающие в библиотеки СССР, которые были посвящены болезненному вопросу о возможных нарушениях СССР порога ПЯВ, вырезались советскими цензорами, даже включая статьи, доказывающие отсутствие таких нарушений.

- *Потенциальная возможность маскировки взрыва повышенной мощности.* Этот метод, получивший название декаплинг (decoupling), позволяет существенно ослабить интенсивность сейсмических волн от взрыва при проведении испытаний в подземной полости. Эта методика была предложена теоретически Latter et al. [1961] для скрытного проведения ПЯВ. Маскировка взрыва на фоне сильного землетрясения, проведение многозарядных взрывов, декаплинг – не раз поднимались американской стороной в ходе международных переговоров.

Экспериментальная проверка этой возможности была проведена США в 1966 г. при эксперименте STERLING в соляных шахтах в Миссисипи. Действительно, зарегистрированный сейсмический отклик на частоте 1–2 Гц был значительно ослаблен, примерно в 60 раз. Это ослабление оказалось существенно меньше теоретически предсказанного, ~200 раз, а в высокочастотном диапазоне (10–30 Гц) декаплинг был еще меньше. Подобный, но более мощный эксперимент (~8 кт) был проведен в СССР в 1976 г. [Adushkin et al., 1993] в полости радиусом ~38 м, созданной предшествующим ПЯВ. Но и здесь степень декаплинга оказалась небольшой, ~30. Таким образом, даже при декаплинге высокочастотные сейсмические сигналы остаются эффективным средством для обнаружения ПЯВ на удалении более 1000 км [Archambeau, 1983]. Все эти способы сокрытия взрывов оказались практически неосуществимыми, но до появления широкой сети наблюдений и высокочувствительных средств регистрации оставались поводами для научных дискуссий и политических споров [Кедров, 2005].

Институт физики Земли

Наилучшим кандидатом на роль исполнителя с советской стороны был Институт физики Земли (ИФЗ) АН СССР – головное научно-исследовательское учреждение в области геофизики в СССР с богатой историей экспериментальной геофизики (<http://www.ifz.ru>). Его возглавлял М. А. Садовский – ведущий в стране авторитет по физике взрыва. В ИФЗ функционировала Комплексная сейсмологическая экспедиция под руководством И. Л. Нерсесова, имевшая богатый опыт подобных работ, полигоны и аппаратуру. В ИФЗ были и специалисты: геофизики, прибористы, программисты, имевшие достаточно высокую квалификацию для решения такой задачи. Организационные вопросы контролировал зам. директора ИФЗ М. Б. Гохберг. В команду, разработавшую и устанавливавшую аппаратуру на полигонах, входили сотрудники ИФЗ С. А. Негребецкий, Б. Н. Казак, М. В. Рожков, Н. Ф. Юхнин, Н. Л. Трапезников, Е. В. Капичников и др. (рис. 1).

Серьезное затруднение для выполнения советской стороной обязательств по заключенному между Академией наук и NRDC соглашению представляло оборудование. В отчете ИФЗ за 1986 г. говорилось: «...в г. Далласе советские специалисты были ознакомлены с техническими характеристиками и образцами сейсмометрической аппаратуры, которой будут оборудованы сейсмостанции во время II-й фазы эксперимента. По своим характеристикам американская аппаратура примерно соответствует лучшим образцам аналогичной советской аппаратуры. Однако с точки зрения технологии и технической готовности имеет существенное преимущество». Это отставание нужно было как можно скорее устранить, создав программно-управляемый комплекс на базе цифровой сейсмической станции и электронно-вычислительного устройства, способный регистрировать и обрабатывать сейсмические данные на уровне американской техники.



Рис. 1. Участники проекта во время совещания в дирекции ИФЗ, Москва.

Возможность для устранения этой трудности существовала. Во второй половине 80-х годов в отделе сейсмологии ИФЗ был выполнен цикл работ по созданию принципиально новых способов измерения и регистрации сейсмической информации. Разработки велись под руководством З. И. Арановича и включали в себя исследования алгоритмов выделения слабых сигналов на фоне помех, способов измерения сигналов в широком динамическом и частотном диапазонах. Были разработаны функциональные принципы построения таких систем и проведены натурные испытания их макетов [Aranovich *et al.*, 1984, Аранович и др., 1987]. Понимая особую важность этих разработок, ИФЗ принял решение о привлечении на контрактной основе Специального конструкторского бюро научного приборостроения АН Грузии (СКБ НП) для изготовления опытных и серийных образцов. Цифровая сейсмическая станция «Гелати» имела расширенные частотный и динамический диапазоны, и была состыкована с программно-вычислительным комплексом. Зав. лабораторией И. Ломтатидзе и инженер-конструктор А. Иваношвили вошли в группу советских специалистов, отправившихся на невадский полигон.

К моменту подписания соглашения между NRDC и АН СССР в ИФЗ совместно с СКБ НП уже был создан и испытан программно-управляемый комплекс ПУСК-1. Специально для советско-американских экспериментов была

произведена модернизация этой аппаратуры и подготовлен макет ПУСК–2 на базе микро–ЭВМ ДВК–3М2 советского производства, полностью соответствующей требованиям советско-американского эксперимента [Отчет..., 1989].

Не все складывалось беспрепятственно и в административной сфере. Когда в августе 1986 г. американские сейсмологи прибыли в район семипалатинского полигона для развертывания сейсмических станций, им обеспечили все условия для установки оборудования и начала работы по записи сейсмических сигналов. Доступ на территорию военного полигона им был закрыт, но топографические, геологические и сейсмические данные и, главное, выбор места установки сейсмостанций вблизи полигона была им предоставлена. В ходе ответного визита, сотрудники ИФЗ И. Л. Нерсесов, С. К. Дараган, Н. Т. Тарасов в ноябре 1986 г. должны были определить порядок проведения аналогичных работ на территории США и выбрать места для трех сейсмических станций вокруг невадского полигона. Однако Госдепартамент США не дал разрешения советской делегации не только на посещение невадского полигона, но и на въезд в штат Невада, поэтому места для установки аппаратуры пришлось выбирать заочно [Отчет ИФЗ..., 1986]. И это несмотря на то, что американские сейсмологи уже установили свое оборудование, и оно функционировало – то есть не было повода сомневаться в том, что советская сторона выполняет свои обязательства [Broad, 1986]. По словам Т. Кохрана, «американские ученые имели больше свободы для проведения научных исследований в СССР, чем советские – в США», т.к. «администрация Р. Рейгана словно бы боялась научной истины» [Cochran, 1987].

Совет по защите природных ресурсов (NRDC)

Эта организация (<https://www.nrdc.org/>) была основана в 1970 г. группой юристов и правозащитников, обеспокоенных вопросами охраны окружающей среды. В нынешнее время NRDC – самая крупная и авторитетная в США организация по защите окружающей среды, которая оказывает поддержку Конгрессу и другим властным структурам в вопросах экологии, и спонсирует научные исследования. При помощи профессиональных юристов, приглашенных экспертов, привлечения негосударственного финансирования и при поддержке более миллиона членов она превратилась в самую эффективно действующую структуру, выполняющую подобные задачи в США.

В восьмидесятые годы именно этой молодой независимой организации выпала роль исполнителя в советско-американском эксперименте, что на первый взгляд кажется весьма странным. Договор о проведении работ был подписан со стороны США негосударственной структурой, не занимавшейся научными исследованиями в сейсмологии. При сложившейся обстановке, оптимальным исполнителем обязательств по договору 1986 г. со стороны США могла быть именно независимая организация. Общее руководство проектом осуществлял физик Т. Кохран. Для NRDC это был самый крупный проект за всю их тогдашнюю 17–летнюю историю. NRDC выполнила функцию подрядчика, взяв на себя все организационные хлопоты, закупки оборудования и главное – приглашение специалистов-сейсмологов: Ч. Арчамбо (Университет Колорадо), Д. Берджера (Институт океанологии Скриппс), Д. Брюна (Университет Невады), К. Пристли (Университет Невады), Д. Эверндена (Геологическая служба), и др. (рис. 2)

Задачи эксперимента

Научно-технические задачи эксперимента сводились к тому, чтобы обеспечить широкополосную цифровую запись сейсмического сигнала от тестового ПЯВ и обеспечить дальнейшую обработку и обмена данными. Научной программой советско-американских работ по контролю ПЯВ определялись три направления исследований [Нерсесов и др., 1991]:

1. Оценка возможностей использования сейсмических методов для контроля соблюдения на полигонах моратория на проведение ПЯВ.
2. Проверка соблюдения ограничения мощности проводимых ПЯВ уровнем 150 кт, предусмотренных договором 1974 г. о пороговом запрещении испытаний ядерного оружия.



Рис. 2. Советские и американские сейсмологи во время обсуждения предстоящих работ по контролю ядерных испытаний на полигоне в штате Невада. Стоят (справа налево): Дж. Берджер, Ч. Арчамбо, Т. Кохран, О. Столяров, Н. Тарасов, К. Пристли. Сидят: С. Дараган, И. Нерсесов, Дж. Брюн, Е. Сутулов. Институт геофизики и планетарной физики Университета Калифорния, Сан-Диего, США, осень 1986 г.

3. Изучение возможностей обнаружения и идентификации слабых ядерных взрывов в случае заключения договора о значительном снижении пороговой мощности испытаний или их полного запрещения.

Для их выполнения необходимо было решить ряд научно-технических задач. Прежде всего, требовалось оценить уровень и спектральный состав микросейсмического фона непосредственно в окрестности семипалатинского и невадского полигонов. Это очень важно для мониторинга слабых взрывов, поскольку возможность уверенной регистрации и оценки их параметров, в основном, определяется фоном микросейсм [Арчамбо и др., 1991]. Минимальный уровень регистрируемых сейсмических сигналов зависит от добротности среды, определяющей степень затухания сейсмических волн, которые используются для распознавания землетрясений, химических и ядерных взрывов. Учет затухания имеет большое значение для повышения точности определения мощности зарядов. Точность оценки мощности ПЯВ также зависит

от их сейсмического КПД, определяемого эффективностью перехода энергии взрыва в энергию сейсмических волн. Для оценки сейсмического КПД ядерных взрывов важно знание скоростей распространения сейсмических волн во вмещающих породах и их добротность в окрестности обоих полигонов.

Помимо перечисленных выше задач, перед участниками эксперимента стояла не менее важная научно-техническая задача – показать, что имеющееся в их распоряжении оборудование (сейсмические датчики, вычислительные средства, цифровые каналы связи) позволяет осуществлять уверенную регистрацию сейсмических сигналов от различных по мощности взрывов, произведенных на обоих испытательных полигонах, проводить их оперативную обработку и идентификацию, обеспечивать хранение и оперативный обмен между участниками договора исходной сейсмологической информацией, получаемой ими в процессе мониторинга. [Archambeau, 1986].

Аппаратура и методика

Реализация намеченной программы совместных работ началась в СССР летом 1986 г. в районе семипалатинского полигона. Были выбраны места для установки трех американских сейсмических станций: Каркаралинск (KKL), Баянаул (BAY) и Карасу (KSU), которые располагались в виде треугольника на расстояниях 200–300 км от полигона в его центре (рис. 3). Основными критериями являлись низкий уровень техногенных микросейсм и наличие выходов консолидированных кристаллических пород. Последнее обстоятельство позволяет существенно повысить соотношение сигнал/шум при регистрации сейсмических событий. Все станции были оборудованы бетонными постаментами и помещениями для установки регистрирующей аппаратуры.

В первой фазе работ в этих сооружениях были установлены временные переносные сеймостанции. Анализ записей микросейсм, полученных на этой аппаратуре, показал, что места для установки этих станций были выбраны удачно. Кроме того, были получены первые записи сейсмических событий – химических взрывов, произведенных на карьерах горнорудных предприятий. Это позволило получить предварительные данные об условиях распространения сейсмических волн в пределах земной коры рассматриваемой области.

С началом второй фазы работ в 1987 г. это оборудование было заменено на более совершенное. Для уменьшения уровня помех на каждой из трех станций была пробурена скважина глубиной ~100 м, в которой был установлен высокочувствительный широкополосный трехкомпонентный сейсмоприемник. Сигналы с выходов короткопериодных сейсмоприемников поступали на аналогово-цифровой преобразователь и далее в реальном масштабе времени вводились в ЭВМ PDP-11/73, где производилась их первичная обработка и запись на магнитную ленту в цифровом виде. Заполненные магнитные ленты со всех трех станций регулярно доставлялись в центр сбора и обработки данных для дальнейшего анализа. Центр был оборудован многотерминальным вычислительным комплексом на базе расширенной модификации ЭВМ PDP-11/73, который позволял выполнять достаточно серьезную математическую обработку больших массивов цифровых данных, поступающих с сейсмических станций.

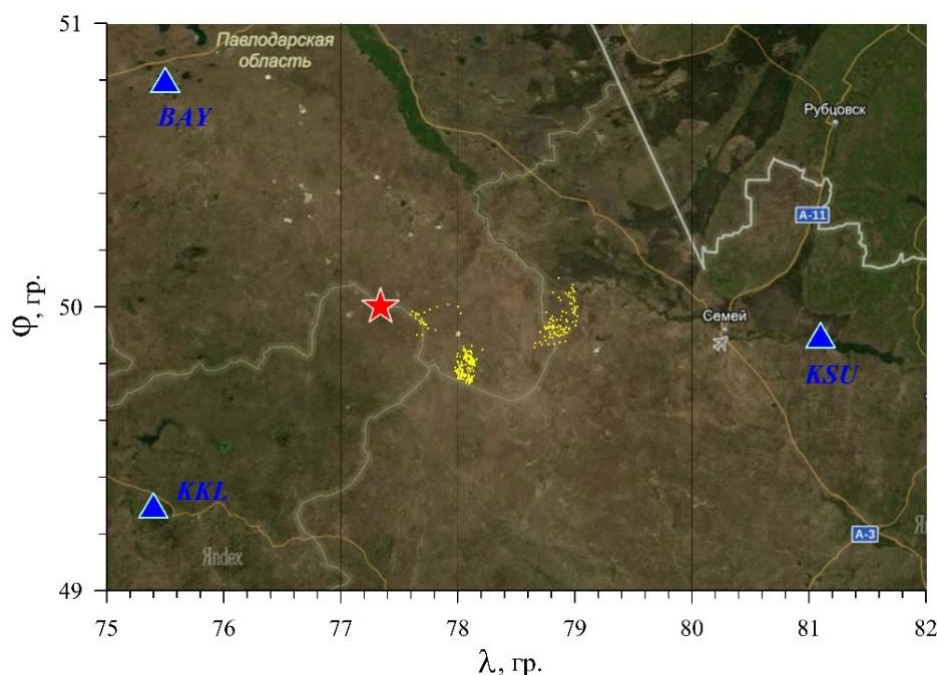


Рис. 3. Советско-американский эксперимент по контролю ядерных испытаний на семипалатинском полигоне в Казахстане. Треугольниками обозначены сейсмические станции Каркаралинск (KKL), Баянаул (BAY) и Карасу (KSU). Звездочкой показано положение калибровочного химического взрыва, произведенного на территории полигона в ходе эксперимента. Желтыми точками отмечены эпицентры ядерных взрывов, произведенных здесь за всю историю полигона (данные с сайта IDC – прототипа международного центра мониторинга ядерных испытаний <http://www.cdidec.org/>).

Аналогичная система наблюдений вокруг американского испытательного полигона в штате Невада была запущена в начале 1988 г. По материалам, предоставленным американскими коллегами, были определены места установки трех сейсмических станций: Нельсон (NEL), Дип Спрингс (DPS) и Трой Каньон (TRC) (рис. 4). Станции образуют треугольник, в центре которого расположен испытательный полигон. Так же, как и в Казахстане, на каждой из них была пробурена скважина глубиной ~100 м и на выходах коренных пород установлены сейсмоприемники. На всех трех станциях было размещено советское оборудование с такими же характеристиками и возможностями, как и на станциях семипалатинского треугольника. Система сбора и обработки данных была реализована иначе. Сигналы с выхода всех регистрирующих каналов станций Нельсон и Дип Спрингс в цифровом виде передавались на геостационарный спутник связи. Со станции Трой Каньон, не имеющей прямой видимости на спутник, цифровые данные передавались по микроволновому радиоканалу на ретранслятор. Сигналы со спутника принимались в Институте геофизики и планетарной физики Университета Калифорнии в Сан-Диего, где был размещен центр сбора и обработки данных. С выхода приемного устройства данные со всех трех станций в режиме реального времени поступали в ЭВМ VAX, где выполнялась их предварительная обработка и запись на магнитную ленту.

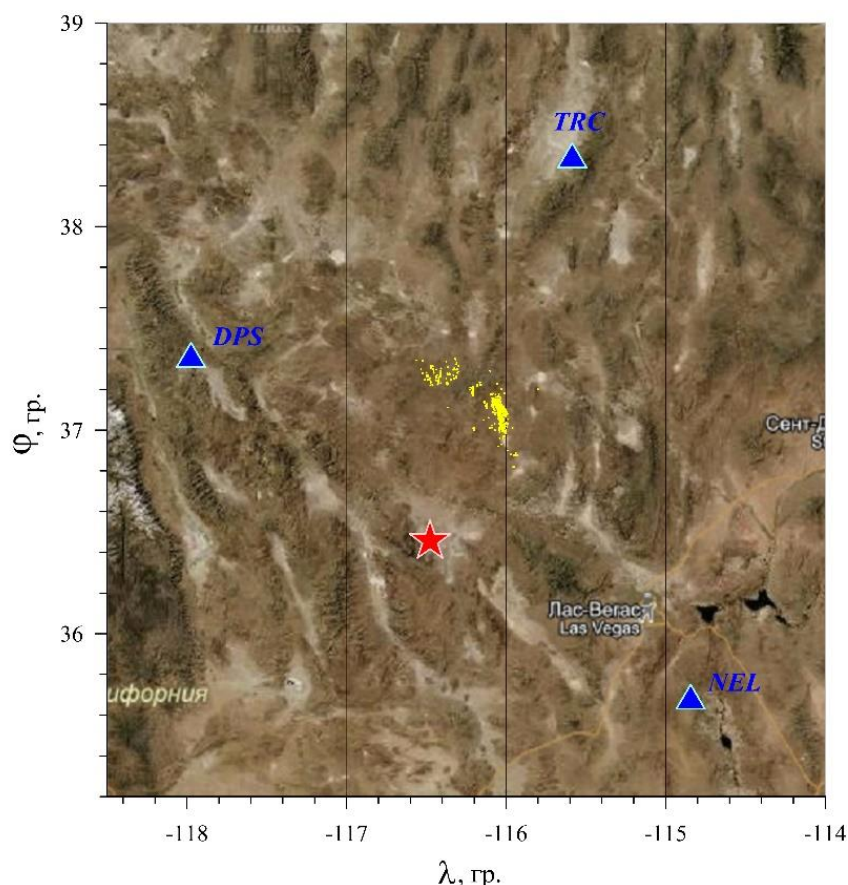


Рис. 4. Советско-американский эксперимент по контролю ядерных испытаний на полигоне в штате Невада. Треугольниками обозначены сейсмические станции Нельсон (*NEL*), Дип Спрингс (*DPS*) и Трой Каньон (*TRC*). Звездочкой показано положение калибровочного химического взрыва, произведенного на территории полигона в ходе эксперимента. Желтыми точками отмечены эпицентры ядерных взрывов, произведенных за всю историю полигона (данные с сайта <http://www.cdids.org>).

Группой советских специалистов на сейсмостанцию Дип Спрингс был доставлен из СССР, установлен рядом с техникой США, смонтирован, отлажен и запущен в работу комплекс ПУСК-2.

Таким образом, в районе семипалатинского полигона в Казахстане и полигона в Неваде были запущены две идентичные системы наблюдений и сбора данных. Для их проверки и калибровки было произведено по три калибровочных химических взрыва с мощностью заряда 10 и 20 т, причем в Казахстане один из них – непосредственно на территории полигона, а два других – за пределами треугольника станций в 200 км к западу (рис. 4). Эпицентры двух других располагались к северо-западу от треугольника станций. Все они были уверенно зарегистрированы станциями этих систем наблюдений с достаточным соотношением сигнал/шум (рис. 5).

Помимо записей калибровочных взрывов за период работы этих систем был получен большой сейсмологический материал для анализа микросейсмического фона. В ходе следующего совместного эксперимента 1988 г., когда США и СССР имели возможность записывать сигнал от ПЯВ на территории страны-партнера, был зарегистрирован комплексом ПУСК-2 ядерный взрыв мощностью до 150 кт [Priestley et al., 1990]. Кроме того, в Неваде были получены записи местных землетрясений, а в районе Семипалатинска, где природная сейсмичность отсутствует, записи промышленных химических взрывов, произведенных на горнорудных предприятиях.

Таким образом, эксперимент значительно подтолкнул развитие экспериментальной базы отечественной геофизики. Задачи эксперимента потребовали создания цифровой сейсмометрической аппаратуры с большим динамическим диапазоном и высокой чувствительностью. Также мониторинг ПЯВ в реальном времени потребовал наличия глобальных высокоскоростных систем передачи больших объемов цифровых данных, которые в то время в СССР практически отсутствовали.



Рис. 5. Первая советская сейсмограмма с записью химического тестового взрыва, полученная на сеймостанции Дип Спригс. Справа налево: М. Б. Гохберг, Б. Н. Казак, С.А Негребцкий, Н. Ф. Юхнин, Е. П. Велихов.

Результаты эксперимента

Детальный анализ микросейсмического фона показал, что его уровень в Неваде существенно выше, чем в районе семипалатинского полигона. В скважинах он гораздо ниже, что позволяло уверенно регистрировать достаточно слабые сейсмические события. Спектральные мощности в скважинах невадских станций имели близкую форму и соизмеримые величины с аналогичными спектрами, полученными по записям скважинных приборов в Казахстане [Berger et al., 1988; Given et al., 1990]. Следовательно, по уровню шумов обе контролируемые стороны находились приблизительно в одинаковых условиях.

По другим геофизическим характеристикам эти полигоны сильно отличаются друг от друга, что обусловлено особенностями их строения. Так, в области семипалатинского полигона скорости продольных волн в коре существенно выше, чем в Неваде: 7,5–7,8 км/с и 6,6–6,8 км/с, соответственно [Нерсесов и др., 1991]. Тем не менее, советским сейсмологам удалось разработать методику, которая

позволяла определять координаты эпицентров взрывов как в Казахстане, так и в Неваде, с точностью до 3–5 км, что является вполне приемлемым результатом для таких эпицентральных расстояний.

Большое внимание и советскими, и американскими сейсмологами было уделено определению разными методами эффективной добротности среды и ее зависимости от частоты. Оказалось, что добротность в районе семипалатинского полигона существенно выше, чем в Неваде, из чего следовало, что на эквивалентных эпицентральных расстояниях амплитуды записей семипалатинских взрывов должны быть более чем в 2 раза больше, чем от аналогичных по мощности взрывов в Неваде. Такое завышение магнитуды семипалатинских взрывов могло достигать 45%, что и являлось одной из причин завышения мощности зарядов этих взрывов [Нерсесов и др., 1991].

Кроме того, высокие значения скоростей сейсмических волн и добротности в районе советского полигона обуславливали более высокий сейсмический КПД семипалатинских взрывов. Это предположение подтвердилось на третьей фазе эксперимента, когда на обоих полигонах были произведены калибровочные ядерные взрывы, мощность которых строго контролировалась гидродинамическим методом CORRTEx. Оценки, выполненные с учетом этих результатов как советскими, так и американскими специалистами [Нерсесов и др., 1991], показали, что условия порогового соглашения 1974 г. об ограничении мощности взрывов 150 кт на семипалатинском полигоне никогда не нарушались.

Результаты эксперимента показали, что геофизические условия в районах расположения семипалатинского и невадского полигонов позволяют с высокой степенью надежности фиксировать взрывы, начиная с мощности заряда порядка 0,01 кт, определять положение их эпицентров и мощность зарядов сетью из 3 станций, удаленных от полигонов на расстояния в 200–300 км [Berger et al., 1988; Given et al., 1990; Нерсесов и др., 1991], т.е. практически контролировать соблюдение моратория на проведение ядерных испытаний. Таким образом, эксперимент показал, что имеющееся оборудование (как американского производства, так и советского) позволяет осуществлять уверенную регистрацию сейсмических сигналов на обоих испытательных полигонах, проводить их оперативную обработку, обеспечивать оперативный обмен исходной сейсмологической информацией. Американские участники убедились в существенном различии в затухании высокочастотных сейсмических волн в земной коре в районах Казахстана и Невады. Таким образом, было окончательно выяснено, что все сомнения в нарушении Советским Союзом верхнего порога в 150 кт по мощности взрывов связаны с некорректным учетом различия свойств среды в области двух полигонов – меньшим затуханием в горной среде Казахстана.

Профессиональные сейсмологи были уверены, что высказываемые опасения того, что какая-либо страна может обходить соглашения, камуфлируя слабые подземные ядерные испытания среди серии землетрясений, абсолютно нереалистичны. Хотя обычному человеку сейсмические сигналы от землетрясения и взрыва кажутся практически неразличимыми, профессиональные сейсмологи могут уверенно различить их благодаря более интенсивной высокочастотной части спектра в сигнале от взрыва. Показательный случай произошел в Казахстане во время проведения второй стадии эксперимента. За 2 минуты до назначенного момента взрыва самописец сейсмографа пришел в движение. Многие из присутствовавших решили, что взрыв был проведен несколько раньше, чем планировалось. Но Х. Эйслер, сейсмолог из Университета

Калифорнии в Сан-Диего, даже без специального анализа быстро распознала, что это был сигнал от дальнего землетрясения, возможно где-то в западной части Тихого океана. Взрыв ядерного устройства был произведен точно по расписанию, и примерно через 25 сек сейсмическая волна взрыва была зарегистрирована.

Проведенный совместный эксперимент достиг своей основной цели – он убедительно продемонстрировал обществу современное состояние проблемы контроля над ПЯВ и технические возможности разрешить её. В результате, возможности политических спекуляций на этой проблеме резко снизились. Эксперименты показали, что даже химические подземные взрывы, которые на 3 порядка слабее, чем обычные ядерные испытания, могут быть точно засечены на телесеизмических расстояниях. Противники запрета на проведение ядерных испытаний лишились своего главного аргумента.

Не только сейсмологи...

Совместный проект дал мощный импульс более широкому кругу исследований, связанных с физикой воздействия ударной волны от ПЯВ на различные геофизические среды, в т.ч. на ионосферу. Теоретические оценки показывали, что акустическая волна от приземного источника при распространении вверх в атмосфере увеличивает свою относительную амплитуду благодаря экспоненциальному спаданию плотности воздуха с высотой. В результате даже сравнительно слабое возмущение в приземных слоях атмосферы должно вызвать заметный отклик в ионосферной плазме, который можно зарегистрировать средствами дистанционного зондирования ионосферы. Независимо геофизиками из Лос-Аламоса и из ИФЗ было предложено дополнить сейсмический мониторинг дистанционным ионосферным зондированием по радиотрассе, проходящей над испытательными полигонами. Соотношение между сейсмическим и ионосферным откликом на взрыв могло бы указать на его природу: подземный ядерный или поверхностный химический.

Более того, к проблеме дискриминации могли бы быть привлечены спутниковые наблюдения. Для проверки этой идеи сотрудники ИФЗ М. Б. Гохберг, О. А. Похотелов и В. А. Пилипенко проанализировали большой объем спутниковых данных, хранящихся в Годдардовском Центре Космических Данных (NSSDC) НАСА. Среди редких событий, когда низкоорбитальный спутник DE-2 пролетал над областью ПЯВ на полигоне Невада не позднее 30 мин после взрыва, удалось обнаружить появление локализованного пятна ионосферной турбулентности [*Гохберг и др.*, 1990]. Таким образом было показано, что ионосферная «пленка», окружающая Землю, является чувствительным индикатором процессов в приземных слоях. Этот результат стимулировал активные исследования по поиску эффектов воздействия на околоземное пространство мощных геофизических явлений: землетрясений, цунами, ураганов, грозных разрядов, и т.п.

Продолжение экспериментов

Описываемые эксперименты стали первым опытом в конце холодной войны непосредственного взаимодействия советских и американских сейсмологов в попытках сделать объективные научные выводы в политизированной области, где независимое экспертное мнение не всегда признается истиной в последней инстанции. Однажды открывшись, эта дверь в научное взаимодействие

в последующие годы раскрывалась все шире. Сотрудничество в сфере верификации ядерных испытаний не ограничилось только описываемым проектом. За ним в 1988 г. последовал совместный эксперимент по контролю ПЯВ гидродинамическим методом, проведенный Всесоюзным научно-исследовательским институтом технической физики (ВНИИТФ) и объединенной группой американских специалистов. В ходе этого эксперимента были проведены контрольные измерения мощности уже не химических, а ядерных взрывов на невадском и семипалатинском полигонах [Priestley et al., 1990]. Были и другие совместные работы, такие как осуществленные Институтом динамики геосфер телесейсмические наблюдения ПЯВ на невадском полигоне из Борового (Казахстан) [Adushkin and An, 1993]. В 1989 г. в районе Ялты под эгидой Академии наук и NRDC был проведен эксперимент, включавший серию тестов различных типов радиационных датчиков для определения наличия ядерных боеголовок на морских судах [Cochran, 1989]. Результаты этого сотрудничества и взаимной открытости не заставили себя ждать. В июне 1990 г. РФ и США подписали новый протокол к договору 1974 г., разрешающий взаимный контроль испытаний, инспекции на месте взрывов, использование трех сейсмических станций национальной сети страны, проводящей испытания.

Со временем подобные совместные мероприятия по взаимному контролю прекратились, когда проблема противостояния России и США в ядерной сфере утратила остроту, а в 1996 г. Генеральной Ассамблеей ООН был принят Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Однако важность советско-американских экспериментов 1986–1988 гг. остается в том, что этот проект, возникший по инициативе академической не в меньшей степени, чем политической, был первой успешной попыткой научного диалога о ядерных испытаниях в конце холодной войны. Профессионализм всех его участников, их стремление при помощи достоверной научной информации доказать возможность взаимного контроля ядерных испытаний и упорство в преодолении технических, административных и политических трудностей вписали важную страницу в историю науки и борьбы за безопасность планеты.

Заключение

Возникает вопрос – дал ли эксперимент принципиально новую научную информацию? Интервью с профессиональными сейсмологами, принимавшими участие в эксперименте, показывают, что большинство результатов были известны специалистам. Действительно, сейсмические методы контроля эффективно использовались обеими сторонами. Все специалисты были уверены в преимуществе сейсмических методов над методом CORRTX, продвигаемым администрацией Р. Рейгана. Большинство сейсмологов были уверены, что это предложение делалось лишь для того, чтобы затормозить реальный прогресс в СТБТ.

О существенно различном затухании сейсмических волн в породах Казахстана и Невады также было хорошо известно американским и советским специалистам. Таким образом, основной результат совместных экспериментов – наглядная демонстрация обществу современного состояния проблемы и имеющихся технических возможностей, что резко сузило возможности для политических спекуляций. Все приведенные выше результаты не оказались удивительными для профессиональных сейсмологов СССР и США и только уточнили существовавшие представления. Таким образом, с чисто академической точки

зрения эксперимент, казалось бы, не дал фундаментально новых, прорывных результатов. Этот проект убедительно продемонстрировал политической элите двух стран возможности современной сейсмологии и тем самым имел большое социальное значение. Такого рода публичный научный эксперимент оказался по-настоящему удачным, и, к сожалению, одним из весьма немногочисленных примеров конструктивных взаимоотношений между учеными и политиками.

Традиционно считается, что в любом обществе важнейшая социальная роль науки заключается в экспертизе крупных государственных проектов. Предполагается, что руководство страны должно обращаться к научному сообществу за такой экспертизой, и на ее основе принимать взвешенное решение. Рассмотрение истории эксперимента показывает, что такая идеализированная схема зачастую не работает. В реальности, в научном сообществе по любой проблеме всегда имеется естественный разброс мнений, и правящая бюрократия выбирает то экспертное мнение, которое ей в данный момент выгодно. В нашем случае видно, что американская администрация, преследуя геополитические цели, в течение долгого времени игнорировала возможность успешного сейсмического мониторинга ПЯВ.

Поэтому для решения спорных вопросов, связанных с геофизической экспертизой, эффективно проведение специализированных тестовых экспериментов. Проблема заключается в том, что государственная бюрократия не будет финансово поддерживать те эксперименты, которые не согласуются с её текущими интересами. Разрешение такой ситуации было продемонстрировано реализацией совместного эксперимента – ключевую роль здесь могут сыграть негосударственные организации. Это возможно в том случае, когда научное сообщество и некоммерческие общественные организации достаточно активны, а истории предыдущих экспериментов описаны и имеются в публичном доступе. Задачей этой статьи было изложение исторического, социального и научного аспектов советско–американских экспериментов по верификации подземных ядерных испытаний как страницы в истории науки во времена холодной войны и примера диалога ученых и общества, который будет полезен для будущего.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность участникам советско-американских экспериментов Н. Т. Тарасову, С. А. Негребецкому, М. Б. Гохбергу и Б. Н. Казаку за подробные интервью и предоставленные материалы и документы из личных архивов, О. Е. Старовойту – за консультации и рекомендации, А. Д. Завьялову – за полезные замечания. Работа выполнена по госконтракту с ИФЗ РАН и ГЦ РАН.

Литература

- Аранович З. И., Негребецкий С. А. и др. (1987) Программно–управляемый сейсмологический комплекс «ПУСК-1» // Сейсмические приборы. № 19. М.: Наука.,
- Арчамбо Ч., Гохберг М. Б., Кедров О. К., Леггет Дж. (1991) Научные и технические основы проверки выполнения договора, ограничивающего ядерные испытания порогом малой мощности, или договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний // В кн. "Верификация.

Проблемы контроля за разоружением". ред. Ф. Калоджеро, М. Гольдберг, С. П. Капица, М.: Мир. 47–120.

Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А., Партасарати С. (1990) Акустическое возмущение от подземного ядерного взрыва как источник электростатической турбулентности в магнитосфере, ДАН СССР, 313, 568–574.

Даффи Г., Лукьянцев В. А. (1991) Улучшение институциональных механизмов для постановки и решения вопросов соблюдения соглашений, в кн.: "Верификация. Контроль за разоружением". М.: Мир, 28–46.

Кедров О. К. (2005) Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. М.: Саранск, 420 с.

Нерсесов И. Л., Пристли К., Мартынов В. Г. и др. (1991) Советско-американские работы по сейсмическому контролю ядерных взрывов. М.: Наука. 144 с.

Отчет о советско-американском эксперименте, проводимом в соответствии с соглашением между АН СССР и СЗПР США, по сейсмическому контролю за непроведением ядерных испытаний (1989) М.: ИФЗ АН СССР.

Отчет ИФЗ им. О. Ю. Шмидта АН СССР по осуществлению и развитию научно-технических связей и сотрудничества с капиталистическими и развивающимися странами (1986) Архив РАН, фонд № 1564, опись № 1, дело № 849.

Adushkin V. V., An V. A. (1993) Teleseismic Monitoring of Underground Nuclear Explosions at the Nevada Test Site from Borovoye, Kazakstan, Science & Global Security. 3, 289–309.

Adushkin V. V., Kitov I. O., Kuznetsov O. P., Sultanov D. D. (1993) Seismic efficiency of decoupled nuclear explosions, Geophys. Res. Lett., 20, 1695–1698.

Alewine R. W., Bache T. C. (1983) Nuclear test yields. Science, 221, 418.

Amramina A., Political seismology or seismological politics: Natural Resources Defense Council–USSR experiments in underground nuclear test verification, Seismological Research Letters, 86, N2A, 2015, doi: 10.1785/0220140183.

Aranovich Z. I., Negrebetsky S. A., Serova O. A. (1984) Digital seismology station (DSS) for information registration in the wide dynamic and frequency ranges // Abstract Gen. Assembly XIX Europ. Seism. Commis. Moscow.

Archambeau C. B. (1986) Verifying a test ban: "A new approach to monitoring underground nuclear tests", Issues in Science and Technology, Winter, 18.

Barth K.-H. (2006) Catalysts of change: Scientists as transnational arms control advocates in the 1980s, OSIRIS, 21, 182–206.

Beardsley T. (1985) Size of Soviet tests disputed by geophysicists, Nature, 315.

Berger J., Eissler H. K., Vernon F. L. et al. (1988) Studies of high-frequency seismic noise in Eastern Kazakhstan, Bulletin Seismological Society America. 78. 1744–1758.

Broad W. J. (1986) Westerners reach Soviet to check atom site, The New York Times, July 6.

Cochran T. B., The NRDC/Soviet Academy of Sciences joint nuclear test ban verification project, *Physics and Society*, 16, N3, 5–8, 1987.

Cochran T. B. (1989) Black sea experiment only a start, *Bull. of the Atomic Scientists*. 45. N9

Evangelista M. (1999) *Unarmed Forces. The Transnational Movement to End the Cold War*, Ithaca and London, 273–274.

Evernden J. F., Marsh G. E. (1987) Yields of US and Soviet Nuclear Tests, *Physics Today*, 40, N 8.

Evernden, J. F., Lies that stopped a test ban, *Bulletin of the Atomic Scientists*, October, p. 20. 1988.

Evernden J. F. (1985) Verification of nuclear testing, *Science*, 792-794.

Evernden J. F., C. B. Archambeau, E. Cranswick, An evaluation of seismic decoupling and underground nuclear test monitoring using high-frequency seismic data, *Reviews of Geophysics*, 24, 143-215, 1986.

Given H. K., Tarasov N. T., Zhuravlev V. I. et al. (1990) High-frequency seismic observation in Eastern Kazakhstan, USSR, with emphasis on chemical explosion experiments, *J. Geophys. Res.* 95, 295–307.

Latter A. L., LeLevier R. E., Martinelly E. A., McMillan W. G. (1961) A method of concealing underground nuclear explosions, *J. Geophys. Res.*, 66. 943–946.

Morrison D. C. (1987) Test ban compliance: Is seismology enough, *Science*, 236, 383.

Priestley K. F., Walter W. R., Martynov V., Rozhkov M. V. (1990) Regional seismic recordings of the Soviet nuclear explosion of the Joint Verification Experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 179–182.

Richards P. G., J. Zavales (1990) Seismic discrimination of nuclear explosions, *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 18, 257–286.

Sykes L. R. (1987) Underground nuclear explosions: Verifying limits on underground testing, yield estimates, and public policy, *Rev. of Geophysics*, 25, 1209–1214.

Von Hippel F. (2013) Gorbachev's unofficial arms-control advisers, *Phys. Today* 66, 41.