

УДК 550.34; 622.83

ВЫБОР ПЛОЩАДОК ДЛЯ СТАНЦИЙ МСМ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ. РЕТРОСПЕКТИВА

© 2024 г. Е. А. Сутулов¹, С. Б. Кишкина^{2, *}¹12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Москва²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: kishkina@idg.ras.ru

В конце 20 века была создана Международная система мониторинга (МСМ), которая возникла в связи с появлением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Большой вклад в формирование условий Договора своими знаниями и авторитетом внес академик РАН Михаил Александрович Садовский, который был участником целого ряда подготовительных совещаний, а на одном из ключевых совещаний экспертов по сейсмическому методу обнаружения ядерных взрывов назначен руководителем советской делегации. М. А. Садовский был не только признанным научным авторитетом в области механического действия взрыва, но и непосредственно занимался организацией наблюдений ядерных взрывов на опытных полигонах. Результаты, полученные под руководством академика М. А. Садовского, положили начало развитию сейсмических методов контроля ядерных испытаний. Основная цель Международной системы мониторинга формулируется как «способствование обнаружению любого ядерного взрыва» и долгое время эта задача оставалась, в основном, в теоретической плоскости. Однако сложившаяся на сегодняшний день политическая обстановка перевела эти вопросы из рутинных процедур во вновь обретающие остроту задачи по своевременному и надежному обнаружению возможных ядерных испытаний. В статье описаны работы, которые были проведены на рубеже веков в ходе выбора мест расположения сейсмических станций, в дальнейшем ставших частью международной системы мониторинга (МСМ). Рассматриваются основные принципы и алгоритмы выбора мест расположения сейсмических станций на основе анализа опыта работ по отбору площадок для станций МСМ на территории России. Пошаговый разбор базовых подходов, использованных в ходе организации сейсмической сети МСМ, может быть полезным при создании новых систем наблюдений для решения разноплановых задач.

Ключевые слова: сейсмическая станция, международная система мониторинга, ядерные испытания, ДВЗЯИ, калибровка, площадка установки сейсмометра, микросейсмический шум.

Для цитирования: Сутулов Е.А., Кишкина С.Б. Выбор площадок для станций МСМ на территории России. Ретроспектива // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 162–176. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_162

Введение

Развитие цифровых технологий и методов обработки больших объемов данных привело к тому, что в последние десятилетия во всем мире активно расширяются сейсмические наблюдения, которые используются в рамках весьма широкого круга задач: от изучения мегаземлетрясений на огромных площадях зон субдукции до оценки локальных микроземлетрясений в районе отдельной шахты или регистрации слабых событий, сопровождающих добычу углеводородов. На территории России появляется все больше временных и постоянных сейсмических систем для мониторинга объектов атомной отрасли и контроля техногенной сейсмичности в районах добычи полезных ископаемых. При организации таких наблюдений, однако, периодически игнорируются некоторые этапы, отсутствие которых способно повлиять на точность получаемых результатов (например, отсутствие калибровки сейсмических каналов).

Большой диапазон проблем, для решения которых используют сейсмические методы, подсказывает, что хотя общие принципы организации сейсмических станций остаются практически неизменными, особенности таких наблюдений должны определяться поставленными перед ними целями и задачами. Цели и задачи, в свою очередь, формируют запрос на основные характеристики сейсмической системы наблюдений в целом и ее отдельных станций в частности.

За последние годы в ряду задач, при решении которых необходимы сейсмические данные, вновь стали актуальными вопросы обнаружения признаков ядерного испытания (ЯИ). Для решения этих вопросов уже в конце 20 века была создана Международная система мониторинга (МСМ), включающая и сеть сейсмических наблюдений. Основная цель мониторинга формулировалась как «способствование обнаружению любого ядерного взрыва». Однако сегодня сложившаяся политическая обстановка перевела эти вопросы из рутинных процедур во вновь обретающие остроту задачи по своевременному и надежному обнаружению возможных ЯИ.

В представленной работе рассматриваются основные принципы и алгоритмы выбора мест расположения сейсмических станций на основе анализа опыта работ по отбору площадок для станций МСМ на территории России. Пошаговый разбор базовых подходов, использованных в ходе организации сейсмической сети МСМ, может быть полезным при создании новых систем наблюдений для решения разноплановых задач. Первая часть статьи посвящена краткому описанию принципов и условий Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и Международной системы мониторинга, а также непосредственному описанию порядка выполнения этапов обследования площадок установки сейсмических станций МСМ на территории России в части предварительного анализа, подготовки оборудования и технических средств для проведения полевых измерений.

Что такое ДВЗЯИ и МСМ. Основные цели и структура

Необходимость реализации целей и задач, стоящих перед сейсмическими наблюдениями в рамках Международной системы мониторинга (МСМ), возникла в связи с появлением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ; на английском «The Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty», СТБТ), который запрещает ядерные взрывы всем и везде: «каждое государство-участник обязуется не производить любой испытательный взрыв ядерного оружия и любой другой ядерный взрыв, а также запретить и предотвращать любой такой ядерный взрыв в любом месте, находящемся под его юрисдикцией или контролем» [ДВЗЯИ, 1996] (<https://www.ctbto.org>).

В период с 1994 по 1996 гг. в г. Женеве (Швейцария) проходили многосторонние переговоры по выработке согласованного текста ДВЗЯИ, которые завершились его принятием на Генеральной Ассамблее ООН 10 сентября 1996 г. Большой вклад в этот процесс внес академик РАН Михаил Александрович Садовский, который был участником целого ряда подготовительных совещаний, а на одном из ключевых совещаний экспертов по сейсмическому методу обнаружения ядерных взрывов был руководителем советской делегации. М. А. Садовский был не только признанным научным авторитетом в области механического действия взрыва [Садовский, 2004], но и непосредственно занимался организацией наблюдений ядерных взрывов на опытных полигонах. В работах М. А. Садовского [Садовский и др., 1983; 1985; 1986; 1989] проведены оценки параметров источника при ПЯВ; на базе полученных результатов формировались зависимости, связывающие сейсмическую и полную энергию подземного взрыва, подтверждена корреляция между сейсмическим эффектом ПЯВ и частотно-временными свойствами Р-волн; показано, что сейсмическая эффективность взрывов в рыхлых породах на порядок ниже (0.3%), чем в плотных (3–6%). Было продемонстрировано, что такой уникальный искусственный источник как ПЯВ позволяет оценить верхний предел полной энергии землетрясения E_0 по наблюдаемым E_c (с учетом того, что подземный взрыв в целом является менее эффективным источником упругих сейсмических волн, чем землетрясение). Результаты, полученные под руководством академика М. А. Садовского, положили начало развитию сейсмических методов контроля ядерных испытаний.

Для окончательного вступления ДВЗЯИ (далее – Договор) в силу была необходима его ратификация странами, которые участвовали в переговорах по ДВЗЯИ и достигли статуса «обладающих ядерным потенциалом», то есть обладали ядерными энергетическими или исследовательскими реакторами к 1996 г., последнему году переговоров.

Российская Федерация стала 58-м государством, ратифицировавшим Договор (30 июня 2000 г.). В 2023 г., в связи со сложившейся международной обстановкой, РФ отозвала ратификацию: это решение было призвано «обеспечить баланс» с США, которые не ратифицировали соглашение. При этом Россия остается государством, подписавшим Договор. До сих пор Договор не вступил в силу из-за отсутствия подписей или ратификации со стороны ключевых стран (помимо США, Договор не ратифицировали КНР, КНДР, Египет, Индия, Иран, Израиль, Пакистан).

На фоне современной политической обстановки условия ДВЗЯИ звучат несколько наивно, однако познакомим читателя с некоторыми из них. Так, в рамках Договора, в целях «укрепления доверия» на добровольной основе государства-участники должны уведомлять ОДВЗЯИ о случаях любого химического взрыва с использованием 300 тонн или более взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, взорванного на их территории. Такие уведомления должны помогать в тестировании и точной настройке сети МСМ (любой известный источник служит своеобразной калибровкой системы) и, соответственно, способствовать устранению из итоговых бюллетеней ошибочно определенных источников сейсмических сигналов.

Если государство-участник ДВЗЯИ заявляет, что обладает данными о произведенном ядерном взрыве, может быть «предпринят процесс консультаций и разъяснений для разрешения и прояснения этого вопроса», а также может быть сделан официальный запрос на получение информации о произошедшем. Однако эта опция будет доступна только после вступления Договора в силу (т.е. когда он будет ратифицирован всеми странами).

Для контроля за соблюдением Договора была разработана строгая система проверок, цель которых – обеспечить международному сообществу возможность обнаружения любого ядерного взрыва, произведенного где угодно (под землей, под водой или в атмосфере). Система сформирована из трех основных компонентов: Международной системы мониторинга (МСМ; The International Monitoring System, IMS), Международного центра обработки данных (МЦД, International Data Centre, IDC) и Инспекции на месте (On-Site Inspections, OSI).

Международная система мониторинга (МСМ), в свою очередь, складывается из сетей сейсмических, инфразвуковых, гидроакустических и радионуклидных станций.

Все данные, полученные в ходе глобального мониторинга, круглосуточно собираются и анализируются в центре обработки данных (МЦД). Результаты, как и первичные данные, доступны всем государствам-участникам Договора. Местоположение и время всех обнаруженных сейсмических источников событий фиксируется МЦД в его бюллетенях. Это могут быть землетрясения, химические взрывы, вулканы и метеориты, которые потенциально могут иметь схожие характеристики с сигналами ядерного взрыва; именно для решения задачи идентификации источника сеть МСМ включает в себя разные виды наблюдений. В случаях, когда МСМ не может уверенно подтвердить факт проведения ядерного взрыва, вступает в действие Инспекция на местах (OSI), миссия которой состоит в поиске доказательств в непосредственной близости от предполагаемого события. После вступления Договора в силу любое участвующее государство сможет запросить Инспекцию на месте, если данные МСМ будут указывать на предполагаемое нарушение Договора [Carrigan, 1993].

Коротко рассмотрим, какие технологии используются в рамках МСМ для обнаружения признаков возможного ядерного испытания [Coyne et al., 2012].

Инфразвуковая технология

Инфразвуковая сеть МСМ является единственной глобальной сетью регистрации акустико-гравитационных волн в приземном слое атмосферы. Все 60 инфразвуковых станций в сети МСМ – это группы станций разной конфигурации, расположенные в 35 странах по всему миру. В период отсутствия

ядерных испытаний работоспособность сети подтверждается, например, путем регистрации таких уникальных событий как падение Челябинского метеорита, зарегистрированного всеми станциями [Le Pichon et al., 2013].

Гидроакустическая технология

Для мониторинга всех океанов, согласно концепции ДВЗЯИ, достаточно всего 11 пассивных гидроакустических станций, которые используются для различения подводных взрывов и других явлений, таких как подводные вулканические извержения и землетрясения.

Радионуклидные наблюдения

Радионуклидные наблюдения обеспечиваются радионуклидными станциями и сетью лабораторий, способных идентифицировать радиоактивные вещества. Восемьдесят радионуклидных станций создаются в МСМ для отбора проб и радионуклидного анализа частиц в воздухе. Задача 16 радионуклидных лабораторий – идентифицировать радиоактивные вещества, источником образования которых является ядерный взрыв. Среди технологий мониторинга в сети МСМ радионуклидный мониторинг является единственным инструментом, обеспечивающим доказательства того, что обнаруженный взрыв является ядерным по своей природе [Coyne et al., 2012].

Можно считать вполне очевидным, что ядерный взрыв, произведенный в воздухе (в атмосфере), генерирует значительные объемы инфразвуковых сигналов и большое количество радионуклидов, что будет явно указывать на проведение испытаний. Подводный взрыв, помимо выброса радионуклидов, будет генерировать четкие гидроакустические сигналы. По этим причинам, а также согласно Договору¹ 1963 г. о частичном запрещении испытаний, все ядерные взрывы с 1980 г. проводились под землей, так что на сегодняшний день именно сейсмическая технология особенно хорошо подходит для определения местоположения потенциального места проведения испытаний.

Сейсмические методы контроля ядерных испытаний

По мнению научных экспертов [Кедров, 2005; Рожденная..., 1999], предварявших и разрабатывавших научно-техническую концепцию МСМ, именно достижение консенсуса по вопросам эффективности сейсмических методов контроля ЯИ явилось важнейшим фактором, позволившим заключить ДВЗЯИ.

Основная цель сейсмической сети станций МСМ, как и всей системы в целом, – способствовать обнаружению ядерного взрыва. Именно сейсмический мониторинг предоставляет информацию о месте проведения предполагаемого взрыва, что позволяет определить район работы Инспекции на месте. На него, в первую очередь, опираются критерии идентификации подземных ядерных взрывов (ЯВ). Основные задачи сети сейсмических станций – регистрация и возможность выделения полезного сигнала на фоне шума. На территории России установлено 6 первичных сейсмических станций МСМ и 13 вспомогательных (см. рис. 1). Основные/первичные – это станции под шифрами PS{32–37}: Хабаз, Залесово, Норильск, Пеледуй, Петропавловск-Камчатский, Уссурийск. Вспомогательные станции AS{82–94}: Киров, Кисловодск, Обнинск, Арти, Сеймчан, Талая, Якутск, Хинганск (вместо Кульдур), Билибино, Тикси, Южно-Сахалинск, Магадан, Белогорное (вместо Зилим).

По количеству объектов МСМ Россия занимает второе (после Соединенных Штатов) место среди всех государств-участников ДВЗЯИ: помимо сейсмических станций (рис. 16), это четыре инфразвуковые станции, восемь радионуклидных станций и одна радионуклидная лаборатория. Список всех станций Международной системы мониторинга (МСМ), включая сейсмические, гидроакустические, инфразвуковые и радионуклидные, представлен на официальной странице ДВЗЯИ <https://www.ctbto.org/our-work/station-profiles>. Планируется, что система МСМ будет состоять из 337 объектов (321 станция мониторинга и 16 лабораторий), размещенных в 89 странах. На сегодняшний день работает около 90% предполагаемого объема, обеспечивая постоянный поток данных в реальном времени.

¹ Между Россией (правопреемницей СССР), Великобританией и США существует «Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и под водой» (Москва, 5 августа 1963 г.).

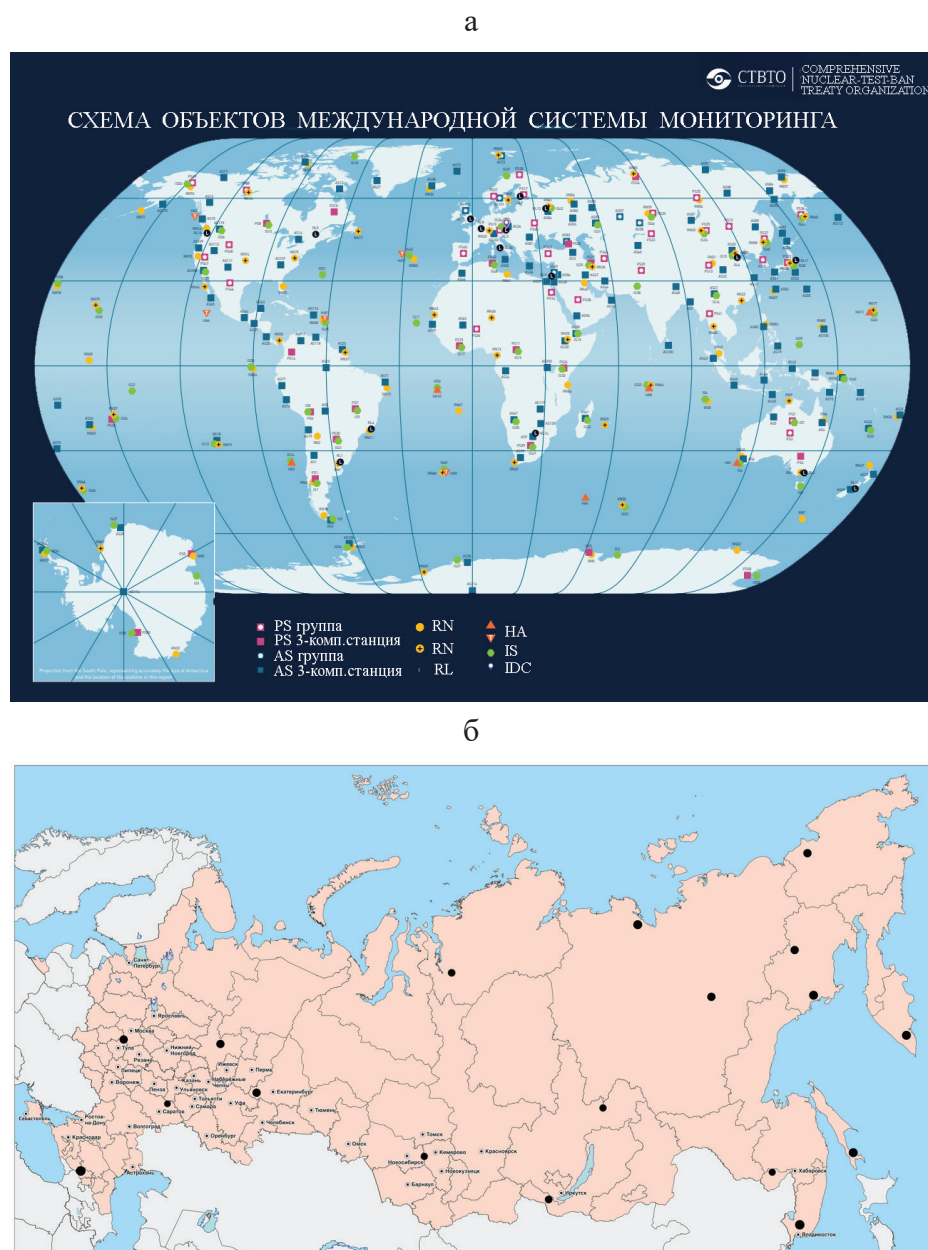


Рис. 1. Схема расположения объектов Международной системы мониторинга: а – в мире (PS – первичные сейсмические станции, AS – вспомогательные сейсмические станции, RN – радионуклидные станции, RL – радионуклидные лаборатории, HA – гидроакустические станции, IS – инфразвуковые станции, IDC – международный центр данных; б – сейсмические станции на территории России. Источник данных www.ctbto.org

Организационная комиссия ДВЗЯИ отмечает (www.ctbto.org), что существующая система международного мониторинга доказала свою эффективность, обнаружив все заявленные Северной Кореей ядерные испытания в период с 2006 по 2017 гг. В дополнение к этому, МСМ постоянно фиксирует широкий спектр явлений, включая землетрясения, извержения вулканов и удары метеоритов, а также неядерные взрывы, такие как трагическое событие в порту Бейрута в 2020 г. [Pilger et al., 2021]. Кроме того, на базе МСМ сформировано более 20 национальных центров предупреждения о цунами, которые получают из МЦД данные о подводных землетрясениях практически в режиме реального времени.

Сформулированные цели и задачи сейсмической сети МСМ, в свою очередь, определяют запрос на основные характеристики всей сейсмической сети в целом и ее отдельных станций. В ходе переговоров по ДВЗЯИ была принята концепция мониторинга Земли, сформированная для обнаружения ядерного взрыва мощностью в 1 кт. Исходя из условий такой умозрительной системы наблюдений, мировыми экспертами выбиралось необходимое и достаточное количество сейсмических станций, подбирались и обосновывались полосы пропускания и необходимые характеристики аппаратуры для проектируемой глобальной системы мониторинга [Coyne et al., 2012; Рожденная..., 1999] (см. табл. 1). Одним из условий, при этом, было заявлено достижение

такой чувствительности системы мониторинга, которая позволяла бы зарегистрировать сигналы от потенциального источника ядерного взрыва как минимум одной станцией, расположенной в радиусе не более 2000–3000 км (на региональном расстоянии) от него.

Таблица 1.

Основные требования к характеристикам сейсмических станций МСМ

Характеристика	Минимальные требования
Тип датчика	Сейсмометр
Тип станции	Трехкомпонентная станция или группа
Расположение	Скважина или штольня
Полоса пропускания для отдельной станции	Для короткопериодных: 0.5–16 Гц, длиннопериодных: 0.02–1 Гц, широкополосных: 0.02–16 Гц
Форма отклика/амплитудно-частотная характеристика (<i>sensor response</i>)	Равномерно распределенная по скорости или ускорению полоса пропускания
Полоса пропускания для датчиков группы	Для короткопериодных: 0.5–16 Гц; длиннопериодного: 0.02–1 Гц
Число датчиков в группе	9 однокомпонентных короткопериодных, плюс 1 трехкомпонентный короткопериодный, плюс 1 трехкомпонентный длиннопериодный
Погрешность калибровки	В пределах 5% по амплитуде и 5° по фазе в полосе пропускания
Собственный шум сейсмометра	≤ 10 дБ ниже минимального уровня шума земли на участке в полосе пропускания
Частота дискретизации	≥ 40 отсчетов в секунду (для отдельных станций и региональных групп); ≥ 4 отсчетов в секунду (для длиннопериодных каналов)
Собственный шум системы	< 10 дБ ниже шума сейсмометра в полосе пропускания
Разрешение	на 18 дБ ниже минимального локального сейсмического шума
Динамический диапазон	< 120 дБ
Абсолютная точность привязки ко времени	< 10 мс
Относительная точность привязки ко времени	< 1 мс между станциями группы
Рабочая температура	От -10° С до + 45° С

Проблема идентификации сейсмических событий с магнитудой $m_b > 4.5$ на сегодняшний день считается практически решенной, поскольку такие события регистрируются многими станциями на разных расстояниях (в основном на телесейсмических) и, соответственно, для них доступно большое количество методов распознавания, включая оценки местоположения источника (более 70% регистрируемых событий происходят в океане), отношения P/S или m_b/M_s (здесь P и S – амплитуды продольной и поперечной волны, m_b и M_s соответствующие магнитуды. При ПЯВ Р-волны заметно превышают поверхностные волны, по сравнению с землетрясениями такой же величины), построение высококачественных моделей источника и пр. При этом для небольших взрывов часто невозможно измерить, например, M_s , труднодостижима для них и достаточно высокая точность определения координат источника (таковой в классических методах принято считать область неопределенности в 1000 км², т.е. площадку радиусом 18 км; для современных подходов точность определения источника возросла в несколько раз), поскольку небольшие события регистрируются малым числом региональных станций. Так что проблема идентификации источников сейсмических сигналов на

региональных расстояниях, в частности, проблема надежного определения подземного ядерного взрыва, – до сих пор весьма актуальна, особенно для небольших событий. И, если при разработке концепции МСМ принималась необходимость обнаружения ядерного взрыва мощностью в 1 кт, то сегодня порог снизился практически в 10 раз. В «идеальных» условиях существующая система МСМ должна позволять обнаруживать и идентифицировать подземные взрывы вплоть до мощности 0.1 кт (для случая контактного взрыва в твердой породе), если взрыв проводится где-либо в Европе, Азии, Северной Америке и Северной Африке (порог обнаружения $3\text{--}3.5 m_b$). Для испытательного полигона на Новой Земле пороговый уровень обнаружения заметно снижен и составляет $2\text{--}2.5 m_b$, что соответствует 0.003–0.01 кт, поскольку для этого района возможно использование данных сейсмических групп [Hafemeister, 2007].

Не будем подробнее останавливаться на вопросах идентификации ЯВ, а также на важнейших задачах оценки мощности и оценки сейсмического действия ПЯВ, поскольку они не входят в круг задач данной статьи: это целые научные направления, которым и по сей день посвящается большое количество работ [Копничев и др., 2001; Кедров, 2005; Бобров и др., 2015а,б; Соколова, 2015; Walter et al., 2005; Dahy, Hassib, 2009; Mostafa, Jamal, 2017; Kim et al., 2018; Bregman et al., 2020, Wang et al., 2021 и многие другие]. Именно методики идентификации ЯВ определяют при организации МСМ основные требования к аппаратуре и местам установки станций [Walter et al., 2005; Mostafa, Jamal, 2017; Kim et al., 2018; Bregman et al., 2020].

На сегодня сейсмическая сеть МСМ состоит из 50 основных или «первичных» станций, которые отправляют свои данные в режиме реального времени в МЦД, и 120 вспомогательных станций, которые предоставляют свои данные по запросу. Используется два основных типа станций: сейсмические группы и отдельные трехкомпонентные станции. Около 60% первичных сейсмических станций – это малобазовые группы, предполагающие площадную расстановку N сейсмических датчиков с линейными размерами в несколько километров. Поскольку порог обнаружения в современных условиях снизился до уровня ниже килотонны, основное внимание стало уделяться мониторингу региональных сигналов, что является основной задачей малобазовых групп – обнаружение и анализ региональных источников на расстояниях не больше 3000 км. Большинство вспомогательных станций – отдельные трехкомпонентные пункты, которые могут быть представлены одним трехкомпонентным широкополосным сейсмометром или отдельно короткопериодным и длиннопериодным датчиками.

Выбор площадок для организации сейсмических станций МСМ на территории России. Подготовительный этап

Рассмотрим подробнее порядок выполнения этапа обследования площадок на территории России с целью оценки их пригодности для последующей организации сейсмических станций в рамках МСМ.

При составлении документов ДВЗЯИ были указаны ориентировочные географические координаты предполагаемых мест установки сейсмических станций по всему миру. На территории бывшего СССР работа по выбору таких потенциальных районов установки проводилась Службой специального контроля (ССК МО РФ) [Отчеты, 1999–2001 и др.] и Комплексной сейсмологической экспедицией (КСЭ) Института физики Земли РАН [Антонова, Аптикаев, 2004; Кедров, 2005]. В результате были найдены наиболее эффективные для регистрации места установки большого числа станций. Но очевидно, что для определения окончательного расположения такого сложного научного объекта как сейсмическая станция необходимо проделать дополнительную работу. При выборе окончательного места установки станции ведется поиск компромиссного решения между её расположением вдали от естественных и антропогенных источников шума, обеспечивающим максимально надежный прием сейсмических сигналов, и приемлемыми технико-экономическими условиями обслуживания станции (энергообеспечение, доступность и пр.).

Далее рассмотрим общий алгоритм ведения работ по обследованию потенциальных площадок и их окончательного выбора для установки сейсмических станций на территории России.

Прежде чем приступать к полевому этапу, проводятся подготовительные работы по сбору и обработке картографических, фондовых и архивных материалов по геологическим, тектоническим, топографическим и геофизическим данным для заданного района. В ходе сбора общих сведений о районе работ описывается административное деление региона, состав и численность населения, существующие пути сообщения. В рамках исследования геологии и тектоники района обследования для всех потенциально подходящих участков выполняется описание регионального геологического строения территории, предоставляется анализ детального геологического строения территории, четвертичной геологии. Обязательно приводится описание имеющихся месторождений полезных ископаемых, что должно определить как близко к разработкам (ведущимся или потенциальным) будут располагаться возможные участки установки сейсмической станции.

Помимо общих характеристик в рабочих материалах предоставляется анализ орогидрографии и растительности. Здесь описываются морфологические особенности рельефа земной поверхности и гидрографических объектов. Такое описание дает представление об условиях работы в данном районе: его проходимости, формах рельефа, наличию речной сети, об условиях водоснабжения, транспорта и пр. Общие характеристики растительности, характерной для описываемого района, призваны дать представление об условиях, в которых предстоит работать сейсмической аппаратуре. Так, если для инфразвуковой аппаратуры густой лес одно из предпочтительных мест установки, то для установки сейсмической аппаратуры наличие лесного массива, как и больших отдельно стоящих деревьев, не является желательным.

Обязательной частью общего описания является оценка климатических условий обследуемого района: вариации температуры воздуха, максимально возможные её колебания от сезона к сезону, возможная продолжительность дождливой или ветренной погоды, снежных буранов, заносов и пр.; приводятся таблицы средних и экстремальных температур воздуха по месяцам, данные об относительной влажности и осадкам, о высоте снежного покрова. Важными являются данные о ветровых нагрузках в районе установки аппаратуры. Климатические данные характеризуют условия, в которых предстоит устанавливать и обслуживать станцию (или группу станций), а также определяют уровень возможного влияния внешних условий на средний уровень микросейсмических шумов в районе установки станций.

Помимо общих характеристик района проводится анализ строения земной коры в зоне обследования (с целью картирования разломов земной коры в потенциальном месте размещения сейсмической станции) и описываются возможные природные опасности. На основании полученных результатов выбирается несколько мест-кандидатов, потенциально подходящих по своим характеристикам для задач МСМ и пригодных для непосредственного проведения работ по обследованию на месте.

Подготовка и контроль характеристик аппаратуры

Параллельно с подготовительным этапом должна проводиться подготовка оборудования и технических средств для проведения полевых измерений. На этапе подготовки к обследованию места размещения сейсмических станций в интересах МСМ проводились работы по выбору технических средств для обеспечения полевых сейсмических наблюдений в районе обследования. Выбиралась аппаратура, неоднократно проверенная в реальных полевых условиях. Обязательно предоставлялось подробное описание всех комплектов аппаратуры и их технических характеристик.

Как правило, для обеспечения сейсмических наблюдений при обследовании мест размещения трехкомпонентных станций подготавливалось два аналогичных комплекта аппаратуры. Если предполагалась организация малобазовой сейсмической группы, то речь шла об установке в скважинах или на поверхности девяти вертикальных сейсмоприемников, распределенных по двум окружностям с общим центром. Радиус окружностей в зависимости от местных условий мог изменяться в пределах от 0.5 до 1 км для внутренней окружности и от 1.5 до 2.5 км для внешней. На внутренней окружности должно быть по возможности равномерно размещено три вертикальных

сейсмоприемника, а на внешней – пять. Один вертикальный сейсмоприемник должен располагаться в центре. Для обеспечения выбора места размещения малобазовой группы подготавливался многоканальный комплекс аппаратуры с использованием радиотелеметрии или девять комплексов регистрации, укомплектованных вертикальными сейсмоприемниками. Помимо этого, использовалась и одна широкополосная трехкомпонентная станция. В крайнем случае предусматривалась возможность попеременного использования 3–4 вертикальных сейсмоприемников и одной трехкомпонентной станции.

Одна из основных задач подготовки сейсмических комплексов к проведению полевых сейсмических наблюдений состояла в получении реальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) каналов регистрации, для чего осуществлялась их калибровка прямым методом. При этом были использованы специальные поверочные сейсмические виброустановки, которые являются рабочими эталонами в Государственной поверочной системе средств измерений сейсмических колебаний. Указанные установки обеспечивали калибровку сейсмических каналов в диапазоне частот 0.01–20 Гц с погрешностью не хуже 3%. Для калибровки сейсмометры устанавливались на рабочем столе виброплатформы и подключались к регистрирующим устройствам. Частота колебаний стола устанавливалась в следующей последовательности: 0.25, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 20.0 и 30. Амплитуда колебаний рабочего стола выбиралась опытным путем в пределах динамического диапазона канала регистрации; по возможности, с превышением уровня сейсмического фона ~ в 100 раз.

АЧХ сейсмических каналов определялись по записям калибровочных сигналов из соотношений:

$$K(f_i) = \frac{U_{\text{вых}}(f_i)}{V(f_i)} \text{ В/м/с или } \Delta(f_i) = \frac{V(f_i)}{N(f_i)} \text{ м/с/ед.мл.разряда,}$$

где $K(f_i)$ – коэффициент преобразования канала (по скорости) на частоте f_i , [В/с/м], $U_{\text{вых}}$ – амплитуда калибровочного сигнала с частотой f_i на выходе канала, [В], $V(f_i)$ – амплитуда колебаний стола виброплатформы (по скорости) на частоте f_i , [м/с]; $V(f_i) = X(f_i) \cdot 2\pi f$, где $X(f_i)$ – амплитуда стола по смещению, [м], $\Delta(f_i)$ – цена младшего разряда (по скорости) цифрового преобразования сигнала для частоты f_i , [м/с], $N(f_i)$ – число единиц младшего разряда, соответствующее амплитуде калибровочного сигнала на выходе сейсмического канала, [ед. мл. разряда].

Пример АЧХ сейсмического канала, полученной по результатам прямой калибровки, приведен на рис. 2. После проведения прямой калибровки сейсмических каналов, АЧХ каналов определялись еще раз: в тех же условиях и для того же ряда частот калибровочных сигналов, но используя косвенный метод калибровки.

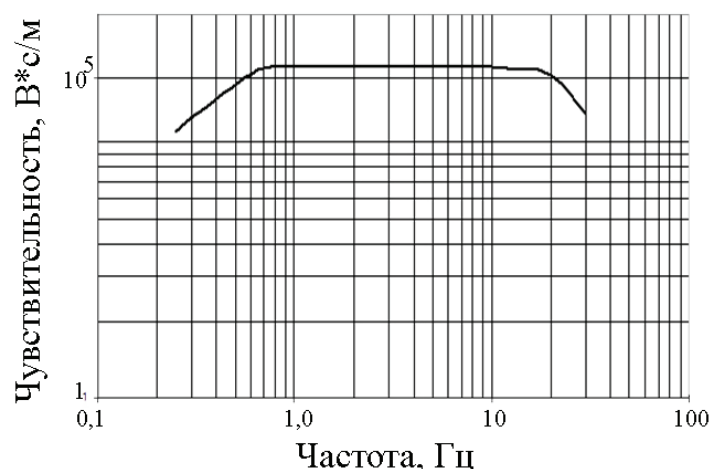


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика одного из сейсмических каналов станции, участвовавшей в полевых наблюдениях

При косвенном методе калибровки сигналы от внутреннего генератора регистрирующей станции подавались на сейсмоприемники по кабельным линиям связи. Параметры сигналов и режим калибровки устанавливались программно. АЧХ рассчитывались по формуле:

$$K_{\text{пр}}(f_i) = \frac{U_{\text{вых}} \cdot K_S \cdot 2\pi f_i \cdot R_K}{U_{\text{вх}} \cdot S_C \cdot l_0^2},$$

где $K_{\text{пр}}(f_i)$ – коэффициент преобразования канала (по скорости) на частоте f_i , [В/с/м]; $U_{\text{вых}}$ – амплитуда калибровочного сигнала на выходе канала, [В]; $U_{\text{вх}}$ – амплитуда сигнала, поступающего в калибровочную цепь канала, [В]; f_i – частота калибровочного сигнала, [Гц]; R_K – сопротивление калибровочной цепи канала, [Ом]; $R_K = R_{KK} + R_6 + R_{\text{л}}$, где R_{KK} – сопротивление калибровочной катушки; R_6 – сопротивление балластного резистора в цепи калибровки, [Ом]; $R_{\text{л}}$ – сопротивление линии передачи сигнала от генератора до сейсмоприемника (измеряется по месту установки аппаратуры), [Ом]; S_C – чувствительность калибровочной катушки, [В/с/м]; K_S – момент инерции маятника сейсмоприемника, [кг·м²]; l_0 – приведенная длина маятника, [м].

Цена наименьшего разряда цифрового кода на выходе канала регистрации рассчитывается по формуле:

$$q(f_i) = \frac{U \cdot S_C \cdot l_0^2}{2\pi f_i \cdot K_S \cdot R_K \cdot N_i},$$

где $q(f_i)$ – значение цены младшего разряда на частоте f_i , [м/с]; N_i – число единиц младшего разряда АЦП (квантов), соответствующее величине амплитуды калибровочного сигнала на выходе канала.

Сравнение АЧХ каналов, полученных разными способами калибровки, позволяет оценить реальные погрешности собственных калибровочных систем сейсмических станций. В ходе дальнейшей работы, для контроля стабильности характеристик каналов регулярно перед началом регистрации и по её окончании проводилась их калибровка косвенным методом. Существенные различия (более 10–20%) текущих данных косвенной калибровки с «эталонными», полученными в ходе поверки, являлись поводом для проведения проверки работоспособности аппаратуры. При обработке данных использовались «эталонные» АЧХ каналов, полученные по результатам прямой калибровки.

В качестве примера характеристик используемой аппаратуры приведем описание комплектов станций, работающих в ходе обследования площадок на о. Сахалин (станция Южно-Сахалинск). Для обеспечения сейсмических наблюдений при проведении обследования в районе г. Южно-Сахалинска использовалось два комплекта аппаратуры портативной сейсмической станции типа ПСС-М производства Конструкторского бюро «Геофизприбор» Российской академии наук, сформированных на базе сейсмоприемников СМ-3КВ-Э и регистратора сейсмических сигналов (РГС). Структурная схема комплекса ПСС-М представлена на [рис. 3](#).

С входов сейсмометров сигналы передавались на входы РГС по кабельным линиям связи. В состав РГС входили платы фильтров (ПФ) и плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопряженная с компьютером. Питание компьютера и сейсмических датчиков обеспечивалось сетевым блоком питания и дублировалось аккумуляторной батареей, встроенной в систему в качестве резервного (или основного, в зависимости от условий регистрации) источника для бесперебойного питания. С входных разъемов РГС сигналы от каждого сейсмометра поступали на соответствующую плату фильтров, где они усиливались (от 0 до 36 дБ с дискретностью 6 дБ, независимо по каждому каналу) и фильтровались. Возможность усиления позволяла оперативно изменять коэффициент преобразования (чувствительность) сейсмического канала. Фильтрация сейсмических сигналов осуществлялась с помощью звеньев фильтров нижних частот, общий порядок которых равен 4, а амплитудно-частотная характеристика формировалась по Баттерворту. Указанные звенья обеспечивали формирование верхней границы полосы пропускания сейсмических каналов и

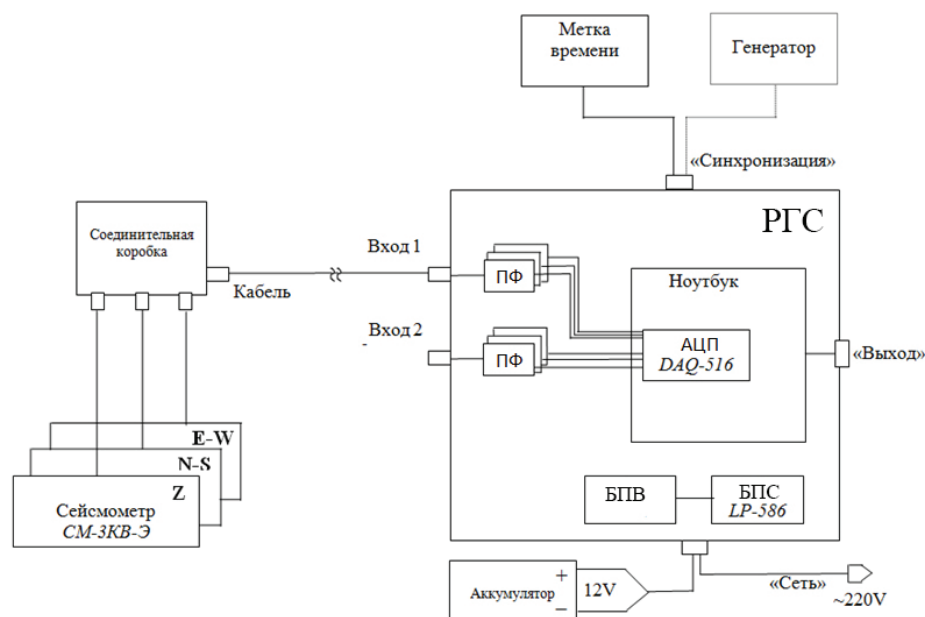


Рис. 3. Структурная схема комплекса портативной сейсмической станции. РГС – регистратор сейсмических сигналов; ПФ – плата фильтра; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БПС – блок сетевого питания и БПВ – вторичный/вспомогательный блок питания

использовались как анти-алийсинговые фильтры. Отметим, что в целом АЧХ сейсмических каналов определяется передаточными характеристиками входящих в них сейсмометров и платы ПФ.

Для привязки цифровой сейсмической информации к единому времени использовались метки времени в виде прямоугольных импульсов. В качестве источника меток времени использовался приемник GPS или кварцевые сейсмические часы.

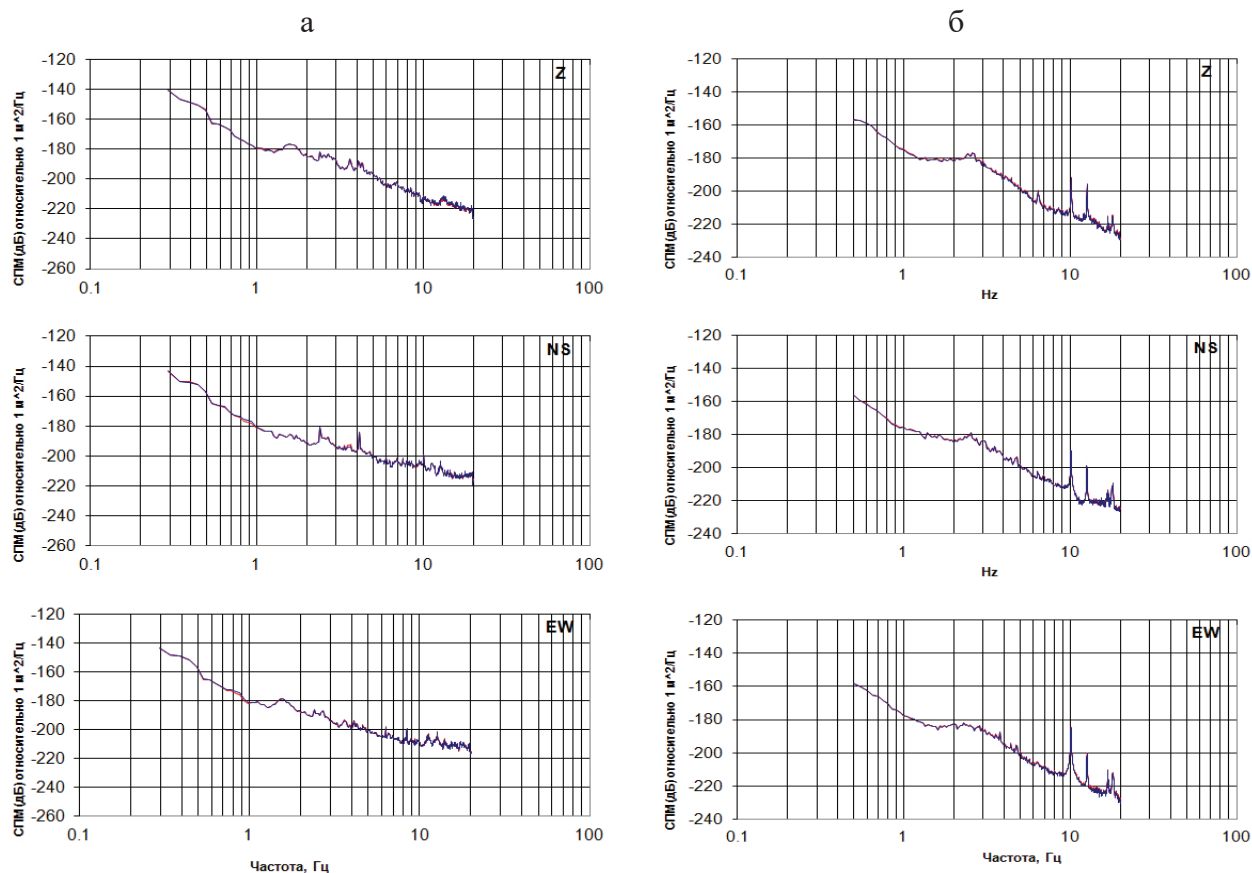


Рис. 4. Результаты оценок сейсмической записи для разных комплектов аппаратуры, установленных в одной точке (разным цветом показаны их спектральные характеристики): Норильск (а), Южно-Сахалинск (б)

Еще один важный шаг оценки характеристик аппаратуры, которым часто пренебрегают, это подтверждение идентичности характеристик регистрирующих каналов. После транспортировки к месту работы вся подготовленная аппаратура устанавливалась на одном фундаменте и включалась на одновременную регистрацию. Грамотная подготовка аппаратуры обеспечивала практически полное совпадение характеристик регистрирующих каналов, что подтверждается тождественностью вычисленных спектральных плотностей сейсмического шума. Это, в свою очередь, обеспечивает уверенность в идентичности измерений при работе с разными комплектами аппаратуры. Примеры оценок данных, полученных в результате такой одновременной регистрации параллельно в двух точках, приведены на [рис. 4](#). Даже без численных оценок хорошо видно, насколько высока идентичность каналов, использовавшихся в ходе работ по выбору площадок (в приведенных примерах – площадок Норильск и Южно-Сахалинск).

Выводы

В зависимости от целей организации мониторинга, выбор характеристик аппаратуры, конфигурации системы наблюдения и некоторых параметров площадок для установки станций, может различаться. Однако рассмотренные базовые принципы, необходимые для корректного выполнения поставленных перед сейсмическими наблюдениями задач, останутся неизменными.

В данной работе описывались первые этапы выбора площадок сейсмических станций для целей Международной системы мониторинга ядерных испытаний (МСМ).

1. Предварительный этап, включающий общее описание географических, геологических и инфраструктурных характеристик района размещения будущей станции. Предварительный выбор нескольких мест-кандидатов для площадки ее установки. Ранжирование мест-кандидатов по степени их соответствия сформулированным требованиям по совокупности признаков, исходя из имеющихся на подготовительном этапе данных. В описываемом случае – требованиям МСМ по подбору аппаратуры, отвечающей целям мониторинга: для первичных станций это частотная полоса не уже чем 0.02–16 Гц и динамический диапазон от 120 дБ.

2. Подготовка аппаратуры к полевым работам. Помимо технического обслуживания приборов важную роль здесь играет получение амплитудно-частотных характеристик сейсмических каналов регистрации. С этой целью должна выполняться сквозная калибровка каналов всех станций, участвующих в работе. Калибровка проводится для канала в полной комплектации: сейсмический датчик, соединительные кабели, фильтры (при наличии), регистратор и т.п. Помимо прямой калибровки на вибростенде, в этот же момент необходимо производить косвенную калибровку, результаты которой в дальнейшем будут сравниваться как с АЧХ, полученной на вибростенде (и принимаемой за эталонную), так и с результатами косвенной калибровки, которая будет проводиться непосредственно на месте регистрации. Такие оценки позволяют учесть возможные погрешности, которые могут возникнуть в результате транспортировки аппаратуры, её установки на площадке или в результате существующих допущений алгоритма (косвенная калибровка, как правило, выполняется на базе собственного программного обеспечения сейсмической станции или внешних программ, специально созданных для этой процедуры). Результаты прямой калибровки каналов регистрации обеспечивают корректность получаемых результатов, а сравнение с результатами косвенной калибровки особенно важны, когда речь идет об оценке очень слабых сигналов (например, при регистрации в асейсмичных платформенных регионах) или при анализе отдельных источников микросейсмического шума.

Еще одним шагом, необходимым для оценки степени идентичности характеристик используемой сейсмической аппаратуры, является установка всех комплектов на общем постаменте для единовременной регистрации. Эта процедура осуществляется после транспортировки станций к месту работы и особенно важна для каналов регистрации сейсмических групп и для комплектов, которые предполагается использовать для одновременной регистрации на разных площадках.

Приведенные работы служат базой для организации и выполнения основного этапа работ, включающего оценку сейсмических характеристик мест-кандидатов на роль площадки для установки сейсмической станции.

Заключение

Работы, описанные в предлагаемой статье, проводились на рубеже 20–21 веков, в самом конце девяностых и начале двухтысячных годов. Несомненно, за последние двадцать лет появились новые инфраструктурные возможности (например, появились мобильные средства повышенной проходимости; разработаны относительно дешевые модульные конструкторы для защиты места установки датчиков от внешних воздействий и др.), упростились методы организации связи и обеспечение электропитанием (существенно подешевели солнечные батареи, появились более емкие и надежные аккумуляторы и т.п.).

Появление новых алгоритмов работы с большими объемами данных и, соответственно, с требованиями, которые предъявляются к формированию массивов таких данных, требуют все большей стандартизации и организации информации [Cultrera, 2021]. Вероятно, развитие методик выбора мест для сейсмических станций в ближайшем будущем будет двигаться именно в этом направлении: в расширении формализации и стандартизации описания параметров площадки установки станции и формирования массивов первичных данных.

Однако, прежде чем подходить к формализованному описанию параметров площадки, необходимо её грамотно выбрать, оценить и проанализировать. При этом остается неизменным взгляд на геологическую и географическую характеристики места установки станции, которая оказывает существенное влияние на возможность регистрации сигналов. В этом плане использование базовых принципов организации крупной сети сейсмических наблюдений, являющейся частью глобальной системы международного мониторинга ДВЗЯИ, может быть весьма полезным при организации любых сейсмических наблюдений, вне зависимости от их масштаба, поскольку в основе организации системы МСМ лежит опыт и экспертные оценки большого числа специалистов мирового уровня, а также практические наработки обустройства более чем 170 сейсмических станций, расположенных по всему миру в разных климатических и инфраструктурных условиях.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900172-5) и Министерства обороны Российской Федерации

Список литературы

- Антонова Л.В., Антикаев Ф.Ф. Уровень короткопериодных микросейсм на территории России и сопредельных государств. Исследования в области геофизики: Юбилейный сборник ОИФЗ РАН. 2004. С. 43–53.
- Бобров Д.И., Китов И.О., Рожков М.В., Фрайберг П. К глобальному сейсмическому мониторингу подземных ядерных взрывов с использованием кросс-корреляции волновых форм. Часть I. Гранд-мастер события // Сейсмические приборы. 2015а. Т. 51. № 2. С. 5–30. <https://elibrary.ru/ulgnfj>
- Бобров Д.И., Китов И.О., Рожков М.В., Фрайберг П. К глобальному сейсмическому мониторингу подземных ядерных взрывов с использованием кросс-корреляции волновых форм. Часть II. Синтетические мастер-события // Сейсмические приборы. 2015б. Т. 51. № 3. С. 22–46. <https://elibrary.ru/umslif>
- ДВЗЯИ. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Подготовительная комиссия Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. 1996. www.ctbto.org
- Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. М. : Наука, 2005. – 301 с.
- Конников Ю.Ф., Шепелев О.М., Соколова И.Н. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов на полигоне Лобнор // Физика Земли, 2001. № 12. С. 64–77.
- Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции AS82 «Киров»: Отчет о НИР / НИИИТ, Москва. 2000.

Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции PS34 «Норильск»: Отчет о НИР / НИИИТ, Москва. 2000.

Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции AS92 «Южно-Сахалинск»: Отчет о НИР / НИИИТ, Москва. 2001.

Обследование площадки для размещения сейсмической станции AS94 «Зилим»: Отчет о НИР / НИИИТ, Москва. 1999.

Обследование площадки для размещения сейсмической станции PS32 «Хабаз»: Отчет о НИР / НИИИТ, Москва. 1999.

Рожденная атомным веком: Сб. исторических очерков, документов и воспоминаний ветеранов к 40-летию создания в СССР Службы специального контроля Министерства обороны. Часть 2 / под ред. А. П. Васильева. Москва. 1999.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясений от объема сейсмического очага // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 598–602

Садовский М.А., Кедров О.К., Лаушкин В.А., Пасечник И.П. Сейсмический эффект подземных взрывов и проблема оценки полной энергии землетрясений // Доклады Академии наук СССР. 1985. Т. 281. № 4. С. 825–829.

Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. К вопросу об энергетической классификации землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 2. С. 3–10.

Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. Об оценке полной энергии коровых землетрясений // Комплексные исследования по физике Земли. М. : Наука. 1989. С. 203–214.

Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М. : Наука. 2004. – 440 с.

Соколова И.Н. Распознавание подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях по записям станций сейсмической сети НЯЦ РК // Вестник НЯЦ РК. 2004. Вып. 3. С. 119–123.

Bregman Y., Lindenbaum O., Rabin N. Array Based Earthquakes-Explosion Discrimination Using Diffusion Maps // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 178 (7). P. 2403–2418. <http://doi.org/10.1007/s00024-020-02452-w>

Carrigan C. On-site inspection: A brief overview and bibliography of techniques pertinent to assessing suspected nuclear test sites. Lawrence Livermore National Laboratory. Office of Scientific and Technical Information (OSTI) 1993. – 11 p.

Coyne J., Bobrov D., Bormann P., Duran E., Grenard P., Haralabus G., Kitov I., Starovoit Y. CTBTO: Goals, Networks, Data Analysis and Data Availability. In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. 2012. P. 1–41. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch15

Cultrera G., Cornou C., Giulio G., Bard P-Y. Indicators for site characterization at seismic station: recommendation from a dedicated survey // Bulletin of Earthquake Engineering. 2021. Vol. 19. P. 4171–4195. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01136-7>

Dahy A., Hassib H.G. Discriminating Nuclear Explosions from Earthquakes at Teleseismic Distances. 2009. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12047431>

Hafemeister D. Progress in CTBT Monitoring Since its 1999 Senate Defeat. Science and Global Security, 2007. Vol. 15. P. 151–183. <https://doi.org/10.1080/08929880701715019>

Kim W.-Y., Richards P.G., Jo E.Y., Ryoo Y.G. Identification of seismic events on and near the North Korean test site following the underground nuclear test explosion of 2017 September 3 // Seismol. Rev Lett. 2018. Vol. 89. P. 2220–2230. <https://doi.org/10.1785/0220180133>

Mostafa A.Z., Jamal M. Discrimination between Earthquakes and Explosion Using MLP and RBF Neural Networks // Biostat Biometrics Open Acc J. 2017. Vol. 2(4). P. 555595. <https://doi.org/10.19080/BBOAJ.2017.02.555595>

Pilger C., Gaebler P.J., Hupe P., Kalia A.C., Schneider F.M., Steinberg A., Sudhaus H., Ceranna L. Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data: Scientific Reports. 2021. Vol. 11. P. 14144. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93690-y>

Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., Brachet N. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40 (14). P. 3732–3737. <https://doi.org/10.1002/grl.50619>

Walter W.R., Gok R., Mayeda K., Sicherman A., Bonner J., Leidig M. Regional Seismic Signals from Chemical Explosions, Nuclear Explosions and Earthquakes: Results from the Arizona Source Phenomenology Experiment. Lawrence Livermore National Laboratory. 2005. – 25 p.

Wang R., Schmandt B., Holt M., Koper K. Advancing local distance discrimination of explosions and earthquakes with joint P/S and ML-MC classification // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48. P. e2021GL095721. <https://doi.org/10.1029/2021GL095721>

SITE SELECTION FOR THE IMS STATION IN RUSSIA. A RETROSPECTIVE

© 2024 **E. A. Sutulov¹, S. B. Kishkina^{2,*}**

¹12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

²Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kishkina@idg.ras.ru*

At the end of the 20th century, the International Monitoring System (IMS) was created, which arose in connection with the emergence of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Academician of the Russian Academy of Sciences Mikhail Aleksandrovich Sadovsky, who participated in a number of preparatory meetings and headed the Soviet delegation at one of the key meetings of experts on the seismic method of detecting nuclear explosions, made a great contribution to the formation of the terms of the Treaty with his knowledge and authority. M.A. Sadovsky was not only a recognized scientific authority in the field of the mechanical action of an explosion, but was also directly involved in organizing observations of nuclear explosions at experimental sites. The results obtained under the supervision of Academician M. A. Sadovsky laid the foundation for the development of seismic methods for monitoring nuclear tests. The main goal of the International Monitoring System is formulated as «facilitating the detection of any nuclear explosion» and for a long time this task remained mainly in the theoretical plane. However, the current political situation has transferred these issues from routine procedures to the newly emerging urgent tasks of timely and reliable detection of possible nuclear tests. The article describes the work that was carried out at the turn of the century in the course of selecting locations for seismic stations that later became part of the international monitoring system (IMS). The main principles and algorithms for selecting locations for seismic stations are considered based on an analysis of the experience of work on selecting sites for IMS stations in Russia. A step-by-step analysis of the basic approaches used in organizing the IMS seismic network can be useful in creating new observation systems to solve various problems.

Keywords: seismic station, site selection, International Monitoring System, nuclear tests, CTBT, calibration, seismometer installation, microseismic noise.