

УДК 550.34; 622.83

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОЩАДОК ДЛЯ СТАНЦИЙ МСМ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ. РЕТРОСПЕКТИВА

© 2025 г. С. Б. Кишкина¹ *, Е. А. Сутулов²

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

²12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Сергиев Посад, Россия

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

Статья посвящена памяти доктора технических наук, профессора А. Б. ПЕШКОВА, научного руководителя работ по выбору мест размещения станций МСМ на территории России.

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. 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), организованной для контроля ядерных испытаний. Рассматриваются основные принципы и алгоритмы выбора мест расположения сейсмических станций на основе анализа опыта работ по отбору площадок для станций МСМ на территории России; приведены некоторые сейсмические характеристики площадок. 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, ДВЗЯИ, площадка установки сейсмометра, микросейсмический шум.

Для цитирования: Кишкина С.Б., Сутулов Е.А. Сейсмические характеристики площадок для станций МСМ на территории России. Ретроспектива // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 2. С. 1–16. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_1

Введение

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) ядерных испытаний. Международная система мониторинга, включающая и сеть сейсмических наблюдений, была создана в конце 20 века для решения задачи обнаружения признаков ядерного испытания.

История создания МСМ, порядок выполнения этапа обследования площадок на территории России с целью оценки их пригодности для последующей организации сейсмических станций в рамках МСМ, а также общий алгоритм ведения работ по обследованию потенциальных площадок и подготовка аппаратуры для обеспечения сейсмических наблюдений при обследовании мест размещения

трехкомпонентных станций рассматривались в [Сутулов, Кишкина, 2024]. Предлагаемая статья представляет собой продолжение описания опыта работ по отбору площадок для станций МСМ на территории России и посвящена этапу оценки сейсмических характеристик площадок.

Обследование мест-кандидатов

Первые этапы выбора площадок сейсмических станций для целей МСМ, включающие описание алгоритмов подготовки аппаратуры к полевым работам (в том числе необходимость сквозной калибровки сейсмических каналов и оценки степени идентичности характеристик используемой аппаратуры), а также общее описание географических, геологических и инфраструктурных характеристик района размещения будущей станции, предварительный выбор нескольких мест-кандидатов для площадки ее установки описаны в [Сутулов, Кишкина, 2024]. 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.

Согласно требованиям МСМ могла предполагаться установка отдельной станции, или организация малобазовой сейсмической группы (установка в скважинах или на поверхности девяти вертикальных сейсмоприемников, распределенных по двум окружностям с общим центром). Поскольку основные требования к размещению отдельной трехкомпонентной станции и малобазовой сейсмической группы одинаковы, рассмотрим их на примере отдельной станции. Отметим, чем отличается выбор места для расположения малобазовой группы, если это будет необходимо.

Непосредственное обследование мест-кандидатов включало в себя маршрутное обследование районов возможного размещения станции с оценкой топографии местности, доступности площадки для персонала и доставки измерительного оборудования в любое время года; оценку возможности отвода земельных участков под станцию, объема строительных работ, в случае необходимости; поиск участков с обнажениями коренных пород, выбор и оборудование конкретных площадок для размещения сейсмической аппаратуры; сейсмическую регистрацию на выбранных участках. Такая работа проводилась для нескольких мест-кандидатов, которые были отобраны по результатам предварительного анализа. На предварительном этапе все места-кандидаты распределялись в порядке полноты их соответствия требованиям МСМ. Однако окончательный анализ возможен только в ходе внимательного изучения обстановки на местности. Основаниями для размещения станции на участке могли являться: подходящая площадка в центре крупного массива коренных пород; наибольшее, по сравнению с другими участками-кандидатами, удаление от дорог промышленных и строительных объектов; удобный доступ и наличие готовой инфраструктуры (в частности, подведенное энергоснабжение). Именно описанные технико-экономические показатели ранжировали участки по степени их пригодности для установки станции. На участке, признанном наиболее перспективным, устанавливалась сейсмическая аппаратура и начиналась непрерывная регистрация (как правило, в течение десяти дней). На альтернативных площадках устанавливались станции для параллельной (с основным пунктом-кандидатом) работы в течение одних-трех суток. Регистрация велась в непрерывном режиме, использовались три сейсмических канала (два горизонтальных, расположенных по сторонам света, и один вертикальный); частота опроса 50 Гц.

Для пространственной привязки точек наблюдения использовалось визуальное определение мест установки сейсмической аппаратуры по топографическим картам крупного масштаба и их уточнение с помощью привязки к GPS. Высотные отметки точек наблюдения определялись по топографической карте. Выбиралось максимально защищенное от ветровых помех место, которое укрывалось для защиты от дождя. Сейсмометры могли располагаться в шурфах или просто на поверхности, тщательно очищенной от различных отложений до плотной коренной породы; при этом площадка установки выравнивалась по уровню и, при необходимости, цементировалась. Для каждого сейсмоприемника оси чувствительности горизонтальных компонент строго ориентировались по сторонам света. Фотографии мест установки временных сейсмических станций в пунктах Зилим, Хабаз и Норильск приведены на рисунках 1 и 2. На рис. 3 представлен общий вид расположения станции Хабаз.

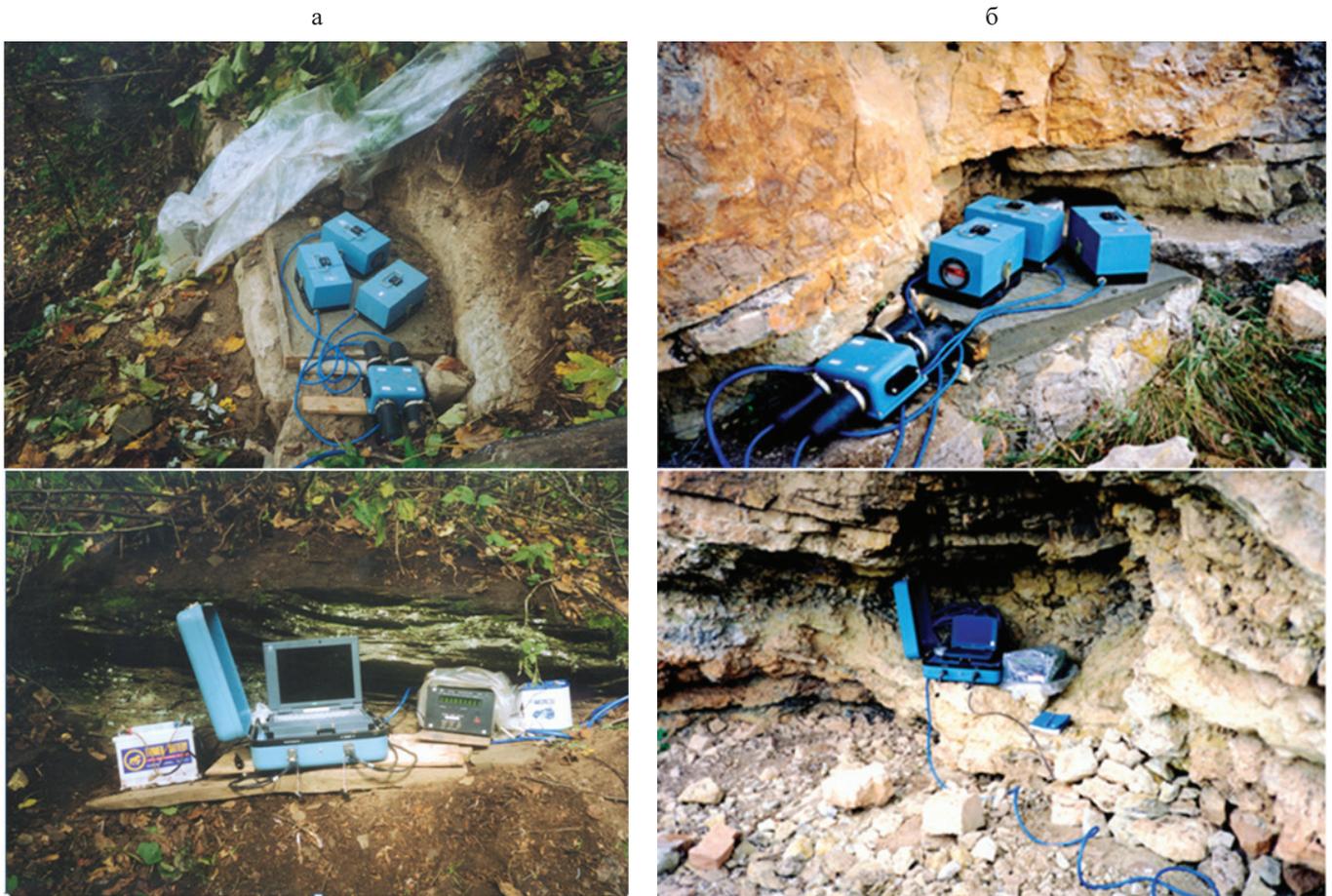


Рис. 1. Площадки установки временных сейсмических наблюдений на площадках Зилим (а) и Хабаз (б), 1999 г. [Отчет «Зилим», 1999; Отчет «Хабаз», 1999]. Использовался аппаратный комплекс ПСС-М (КБ «Геофизприбор» РАН) на базе сейсмоприемников СМ-3КВ-Э [Сутулов, Кишкина, 2024]



Рис. 2. Установка сейсмометров СМ-3КВ-Э на площадке S1 (Норильск). В кадре Е. А. Сутулов, 2000 г.

Все сведения по организации и проведению полевых работ подробно описывались (в «Дневнике проведения работ») с обязательным добавлением метеосводки и реально наблюдаемых условий в период проведения наблюдений (например, отмечалось движение транспорта или слышимые раскаты грома и пр.). Отметим, что при добросовестном ведении дневника, данная опция, несмотря на кажущуюся патриархальность, является весьма полезной при организации наблюдений и в ходе последующего анализа данных.



Рис. 3. Станция Хабаз, 1999 г. (общий вид)

В случае выбора места для установки группы необходимо было выбрать площадки для размещения аппаратуры на центральном и периферийных пунктах. При этом площадки должны были обеспечивать формирование требуемой конфигурации группы и соответствовать условиям доступного подъезда автотранспорта и возможности установки в дальнейшем бурового оборудования (в случае организации скважин). Отдельным требованием при выборе места для расположения малобазовой группы является минимальный перепад высот в пределах установки сейсмоприемников, а также отсутствие растительности, способной ухудшить или нарушить передачу сейсмических данных по радиоканалам связи.

В ходе обследования площадки проводилась одновременная регистрация на всех пунктах малобазовой группы. В случае отсутствия возможности проведения параллельной регистрации девятью комплектами одновременные наблюдения проводились на трех-четыре (в зависимости от наличия аппаратуры) пунктах, оснащенных вертикальными датчиками, и на трехкомпонентной станции, установленной в центральной точке. На центральной станции регистрация велась в непрерывном режиме 10 суток, а вертикальные пункты переносились на все предполагаемые точки установки по очереди – регистрация на каждом составляла не менее суток. По окончании работы на каждом пункте проводилась калибровка канала и сверка временной шкалы.

Оценка сейсмических характеристик мест-кандидатов

Одним из самых важных критериев выбора места установки сейсмической станции является характеристика наблюдаемого микросейсмического шума и сейсмических сигналов. Способность самого чувствительного оборудования может быть ограничена высоким фоновым уровнем колебаний или, например, наличием большого числа периодически возникающих помех. Исходя из подобных соображений, место, на котором средний уровень шума в ускорениях превышал значение -135 дБ относительно величины $1 \text{ (м/с}^2\text{)}^2/\text{Гц}$ на частоте 5 Гц , исключалось из дальнейшего рассмотрения [Smith, 1987; Coyne et al., 2012]. Среди оставшихся кандидатов приоритет отдавался месту, в

котором спектральная плотность сейсмического шума являлась минимальной, а отношение сигнал/шум, при этом, наибольшим. При близких характеристиках мест-кандидатов выбиралась площадка с наименьшими ожидаемыми затратами по размещению, строительству и обеспечению функционирования объекта.

Методика оценки характеристик микросейсмического шума включала следующие этапы:

(1) выделение из суточной записи восьмичасовых реализаций микросейсмического фона: четыре часа в дневное и четыре в ночное время, как правило, выбирались интервалы с 12 до 16 часов в дневное время и с 02 до 06 часов ночью по местному времени;

(2) визуальный просмотр выделенных реализаций с целью выбора участков шума без видимых сигналов;

(3) выделение в пределах каждого из выбранных участков фрагмента записи (~ 11 минут) и разделение его на блоки длиной около 20 секунд с перекрытием на 1/2 длины блока;

(4) вычисление среднего спектра мощности для выбранных фрагментов шума с учетом АЧХ канала регистрации;

(5) вычисление среднего значения и стандарта спектра мощности по всей выборке данных.

Примеры спектров мощности микросейсмического шума (по смещению) для разных станций приведены на рис. 4. Уровни дневного (красные линии) и ночного (синие линии) шума в сравнении с моделью микросейсмического шума Петерсона [Peterson, 1993] приведены для станций Южно-Сахалинск (рис. 4а) и Хабаз (рис. 4б).

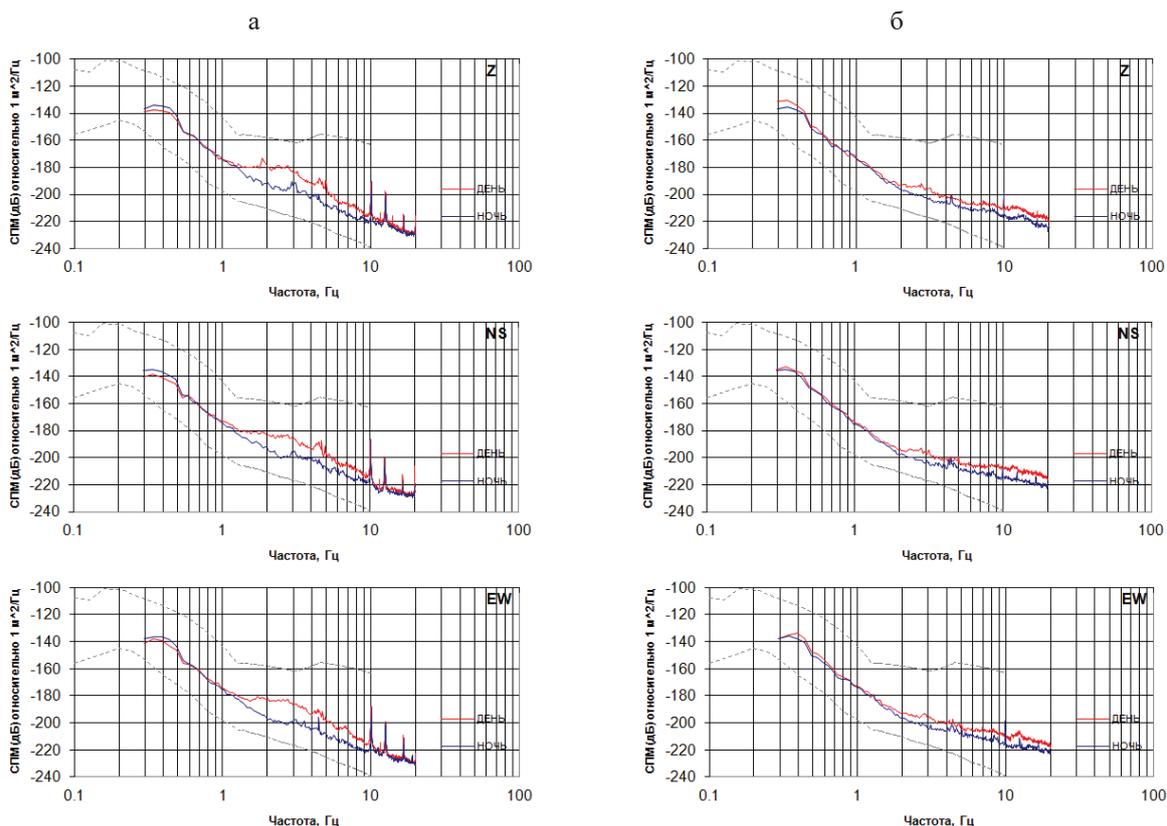


Рис. 4. Примеры спектров мощности дневного (красная линия) и ночного (синяя линия) микросейсмического шума (по смещению) для станций Южно-Сахалинск (а) и Хабаз (б) [Отчет «Южно-Сахалинск», 2001; Отчет «Хабаз», 1999]. Серые пунктирные линии соответствуют максимальному и минимальному уровню модели микросейсмического шума Петерсона [Peterson, 1993]

Анализ позволил выявить наиболее общие характеристики сейсмического шума на исследуемых площадках. Обобщенно полученные результаты можно описать так:

– дневные и ночные вариации сейсмического шума в течение всего срока наблюдения незначительны и подобны по форме; наиболее заметные суточные вариации на частотах выше 2 Гц в значительной мере определяются близостью к городу района обследования (в частности, на станции Южно-Сахалинск (рис. 4а) усиление шума в дневное время достаточно заметно: уровень шума в полосе 2–6 Гц превышает ночной и воскресный уровень фона на 6–10 дБ);

– на частотах свыше 1 Гц места размещения постаментов станций характеризуются достаточно низким уровнем фона: на частоте 5 Гц не превышает -200 дБ относительно $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$ по смещению¹, что ниже порога -195 дБ (или -135 дБ относительно величины $1 \text{ (м/с}^2\text{)}^2/\text{Гц}$ по ускорению), допускающего использование станции в системе МСМ;

– сейсмические шумы на горизонтальных и вертикальной компонентах подобны по форме и уровню, но некоторые спектральные пики отличаются по интенсивности на различных компонентах.

Отметим, что современные методы анализа сейсмического шума путем расчета спектра плотности мощности строятся на построении вероятностной модели шума по функции плотности вероятности, которая рассчитывается на больших непрерывных временных отрезках данных по значениям спектральной плотности мощности, без выбора участков записи, неосложненных сейсмическими сигналами [McNamara, Buland, 2004]. Так же, как и отдельные спектральные функции, вероятностные модели сопоставляются с эталонными моделями максимального и минимального уровня микросейсмического шума [Peterson, 1993]. Пример результата анализа одних и тех же данных, проведенного с помощью двух методов, показан, например, в [Беседина, Тубанов, 2023]. Очевидно, что современные методы способны обработать огромные массивы информации и требуют меньше человеческих ресурсов, однако не выявляют тонких не стационарных особенностей участка.

Уже в шестидесятых годах прошлого века было достаточно убедительно показано, что микросейсмический шум, убывая по классической зависимости ω^{-2} , может существенно возрасти на высоких частотах. В таких случаях ведется поиск антропогенного или природного источника окрестности наблюдений. При этом полоса частот и уровень шума существенно варьируются в зависимости от характера источника и расстояния до него, от геологического строения в месте установки станции и пр.

Работы по выбору мест-кандидатов для установки сейсмических станций не предполагали тщательного научного анализа всех источников, влияющих на характер сейсмической записи. Важно было определить потенциальную способность станции, установленной в данном месте, выполнять необходимые функции с должной степенью надежности. Так, например, на сейсмических записях периодически отмечалось наличие монохроматических колебаний, которые обычно свойственны стационарным установкам (дизель-генераторам или электрическим двигателям, связанным с производством или потреблением энергии). Суточные изменения интенсивности колебаний на отдельных частотах в течение всей недели подсказывали, что источником, вероятнее всего, является предприятие с непрерывным циклом работы. Наиболее вероятным кандидатом в случае рассматриваемого примера являлась ТЭЦ на северо-востоке г. Южно-Сахалинска, примерно в 3.5 км к северо-западу от района обследования. Версию подтвердило и увеличение интенсивности колебаний в этом диапазоне при регистрации, которую провели на площадке, расположенной ближе к ТЭЦ.

Отметим, что в принципе знание источника помех такого типа не дает особых преимуществ; необходима только оценка возможности их устранения: например, возможно ли обеспечить это процедурой фильтрации или режекцией сигнала в узком диапазоне частоты-помехи.

Непрерывная регистрация в ходе выбора площадки станции проводилась продолжительными интервалами (от нескольких суток на альтернативных площадках до десяти дней в районе основного места-кандидата). Как уже отмечено выше, на участках, выбранных для установки станций МСМ, изменения уровня фона в течение недели и суток, как правило, незначительны. Это может быть высокая стабильность уровня фона и его формы в широкой полосе частот (обычно для станций, удаленных от всех антропогенных источников). Или, наоборот, вследствие непрерывного процесса

¹ $A_{\text{смещ}} = A_{\text{уск}} + 20\lg(P^2/4\pi^2)$ дБ относительно $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$ [Peterson, 1993].

производства (как, например, на станции Норильск, где отчетливо проявляются суточные вариации на частотах свыше 1 Гц, отражающие непрерывный трехсменный рабочий цикл производства на горнодобывающих предприятиях).

Отдельно оценивались вариации шума, связанные с ветровыми помехами и такими источниками шума, как железные дороги. В отличие от стационарных источников монохроматических колебаний, такие помехи, как ветер, железная дорога и промышленные взрывы генерируют сейсмические сигналы в довольно широком диапазоне, что может послужить препятствием для регистрации слабых сейсмических сигналов.

Интересный пример, связанный с ветровой нагрузкой, приведен в [Smith, 1987], где описана сейсмическая станция в Техасе (Lajitas), уровень микросейсмического шума в месте установки которой на частоте 10 Гц ниже на 20 дБ, чем в месте установки станции NORESS. Однако станция сильно зависит от ветровой нагрузки, что существенно снижает «ценность» станции с «минимальным уровнем шума», поскольку он достижим только и исключительно в безветренную погоду. Хотя причина столь высокой чувствительности станции Lajitas к ветровой нагрузке выходит за пределы наших интересов, отметим, что пример и в самом деле представляет интерес с точки зрения выбора места установки сейсмической станции. Smith (1987) отмечает, что в непосредственной близости (в радиусе менее 50(!) метров) от приборов и скважин находятся многочисленные сооружения (трейлеры, навесы с жестяной крышей, электрические столбы), которые могут вибрировать даже при легком ветерке; так что указанную чувствительность станции к ветровой нагрузке можно считать артефактом.

Ветровые помехи – среди рассматриваемых площадок – наиболее ярко были выражены в районе расположения станции Норильск, где, согласно общему описанию района работ, скорость ветра может достигать 28 м/с, а в периоды зимних штормов – 40 м/с. Ветровые помехи наблюдались здесь на всех трех компонентах и в широкой полосе частот от 0.5 до 20 Гц. Примеры записи микросейсмических колебаний, зарегистрированных в ходе выбора места установки станции Норильск при разной скорости ветра, и соответствующие спектральные характеристики приведены на рисунках 5 и 6. Видно заметное повышение уровня фона при усилении ветра: уровень амплитуд микросейсмического фона существенно возрастал при усилении ветра (рис. 5); спектральные характеристики демонстрировали повышение уровня фона в диапазоне частот выше 1 Гц на 10–20 дБ (рис. 6) в зависимости от условий. Анализ проведенных измерений позволил говорить о том, что «заметной» можно считать скорость ветра от 4 м/с и выше. Записи приведены в относительных единицах, поскольку в данном случае нас интересует иллюстрация повышения уровня микросейсм при ветровом воздействии. Абсолютные амплитуды при

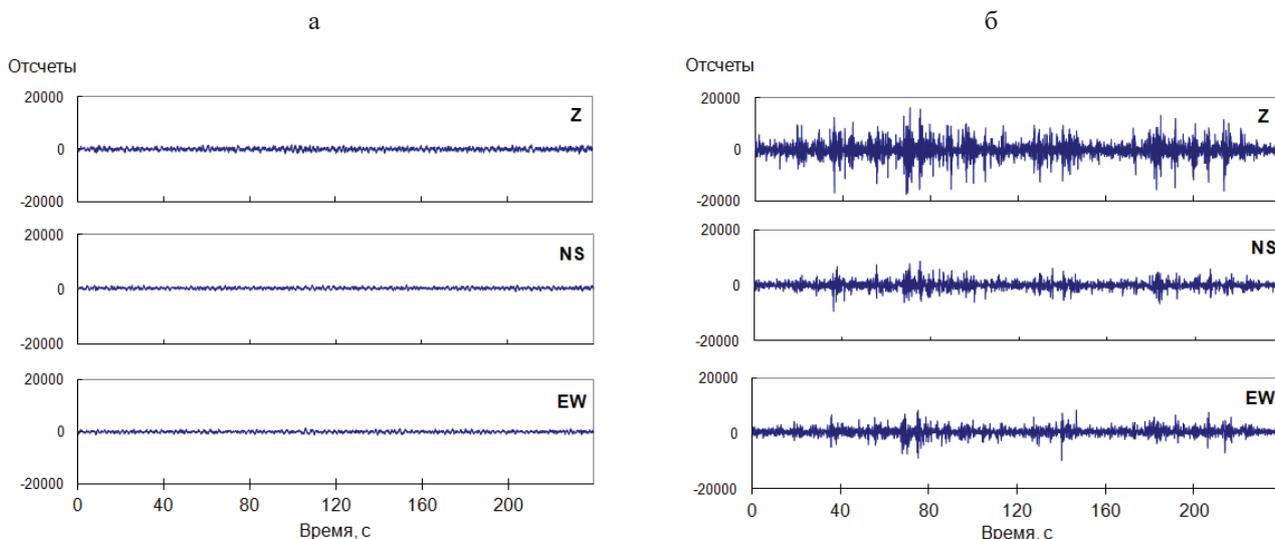


Рис. 5. Примеры сейсмической записи микросейсмических колебаний, зарегистрированных на станции Норильск при разной скорости ветра от 2–3 м/с (а) до 13 м/с (б) [Отчет «Норильск», 2000]

этом существенно зависят от местных условий. Если район обследования характеризуется высокими скоростями ветра, в рекомендациях к организации сейсмической станции записывают предложение размещения сейсмических датчиков в скважине.

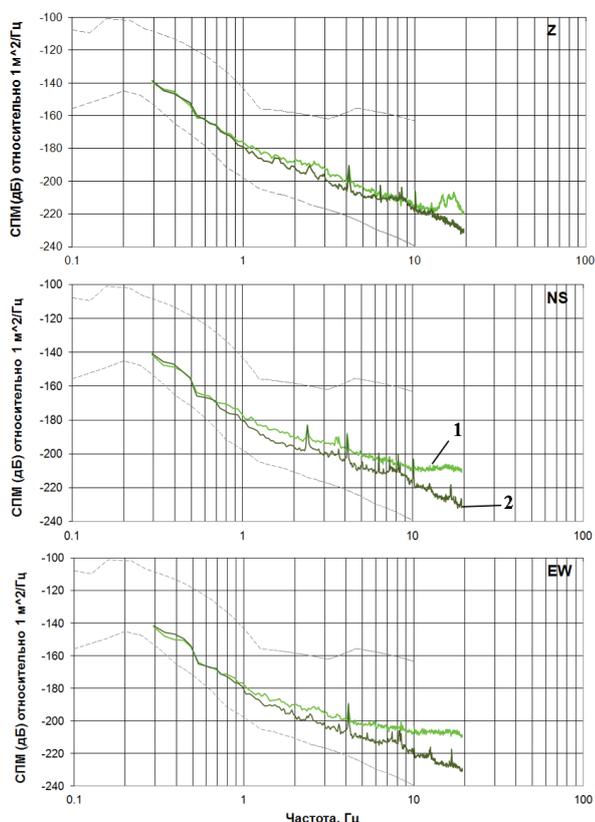


Рис. 6. Сравнение спектральной плотности мощности микросейсмических колебаний (по смещению), зарегистрированных в дневное время суток на одной площадке при разной скорости ветра: 1 – средняя скорость ветра 8–12 м/с (светлая линия); 2 – средняя скорость ветра 2–3 м/с (темная линия) [Отчет «Норильск», 2000]. Серые пунктирные линии соответствуют максимальному и минимальному уровню модели микросейсмического шума Петерсона [Peterson, 1993]

Пример на рис. 7а относится к железной дороге г. Норильска – порт Дудинка, проходящей в 3.5 км к северу от площадки регистрации. В 2000 г. дорога эксплуатировалась круглый год, интенсивность движения поездов 4–6 в сутки. Хорошо видно, что продолжительность интенсивной фазы шума не превышает 3–5 минут, а в спектральной области он проявляется на частотах свыше 2 Гц, с максимумом в полосе 4–6 Гц. В этой полосе уровень шума увеличивается на 10–12 дБ.

К местным источникам шума следует отнести и промышленные взрывы (пример см. на рис. 7б). Спектры сейсмических сигналов такого рода, как правило, превышают спектры сейсмических шумов в широком диапазоне частот 0.5–20 Гц. Выраженная спектральная модуляция в этом диапазоне частот является одним из признаков, характерных для сигналов короткозамедленных взрывов [Суворова, 1981; Baumgardt, 1988; Smith, 1989]. В районе всех обследуемых площадок взрывы проводились достаточно далеко от места установки станций, нерегулярно и достаточно редко, так что они не оказывали заметного влияния на работу сейсмических станций.

Как уже отмечалось, параллельно с основным местом-кандидатом для установки сейсмической станции МСМ проводилась регистрация сейсмических колебаний и на альтернативных площадках. Примеры спектральных характеристик микросейсмического шума (по смещению) для двух площадок (основной S0 и альтернативной S1) приведены на рис. 8 для окрестностей станций Киров, Хабаз, Норильск и Южно-Сахалинск. В случае близости уровней сейсмических шумов и сигналов на разных участках, т.е. на большой площади обследуемого района, – делался вывод, что поиск нового места с существенно более низким уровнем фона в данном районе может быть прекращен и основное внимание следует уделять выбору участка по технико-экономическим условиям строительства и эксплуатации новой станции. Иначе выбирался самый тихий участок. Так, видно, что альтернативная площадка S1 для станции Киров имела заметно более низкий уровень микросейсмического шума в полосе частот свыше 1 Гц и, соответственно, получила приоритет по сравнению с базовой площадкой S0.

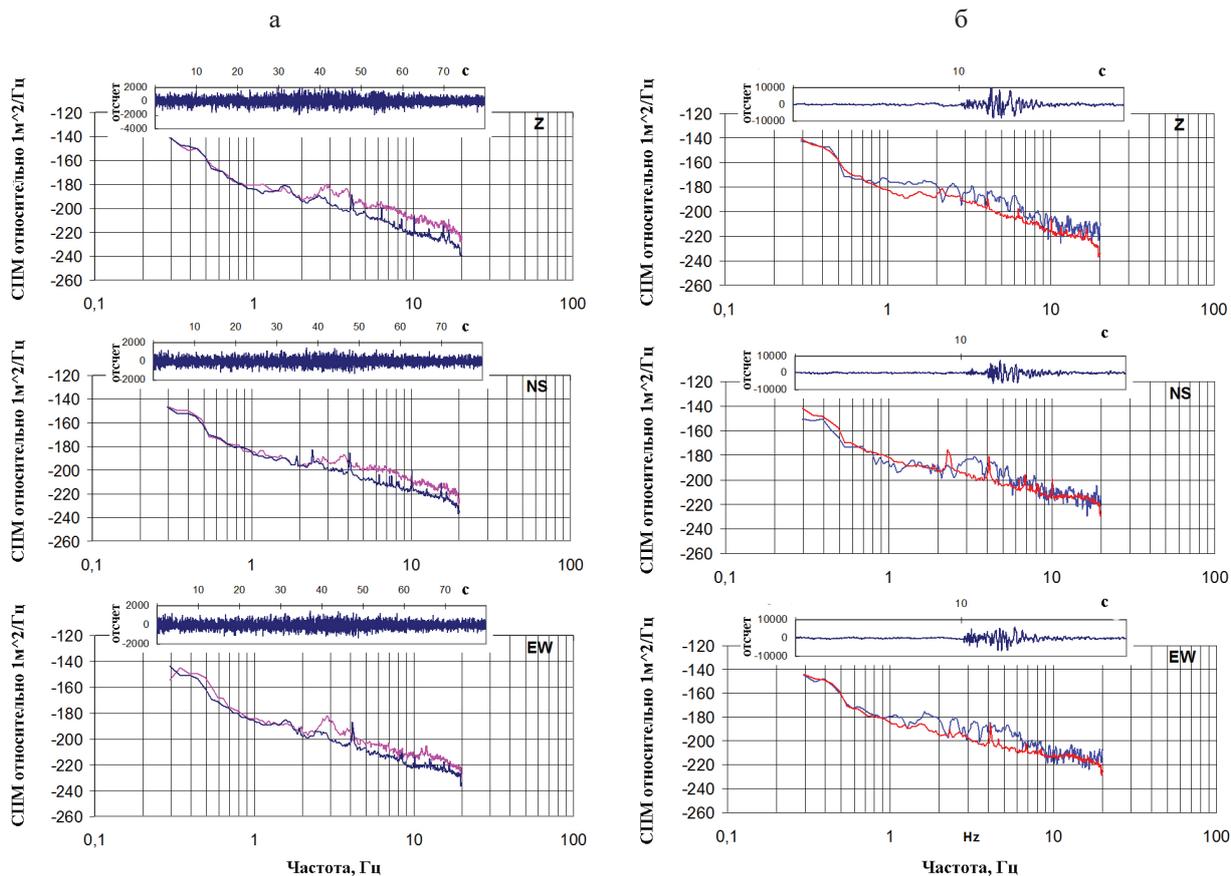


Рис. 7. Примеры сигналов и соответствующих им спектральных характеристик (по смещению) для антропогенных сигналов (синий цвет графика) в сравнении с уровнем микросейсмического шума в это время (красный цвет): поезд (а) – превышение уровня шума в широкой полосе частот 2–20 Гц; карьерный взрыв (б) – превышение уровня шума в широкой полосе частот 1–20 Гц, выраженная спектральная модуляция частот, Норильск [Отчет «Норильск», 2000]

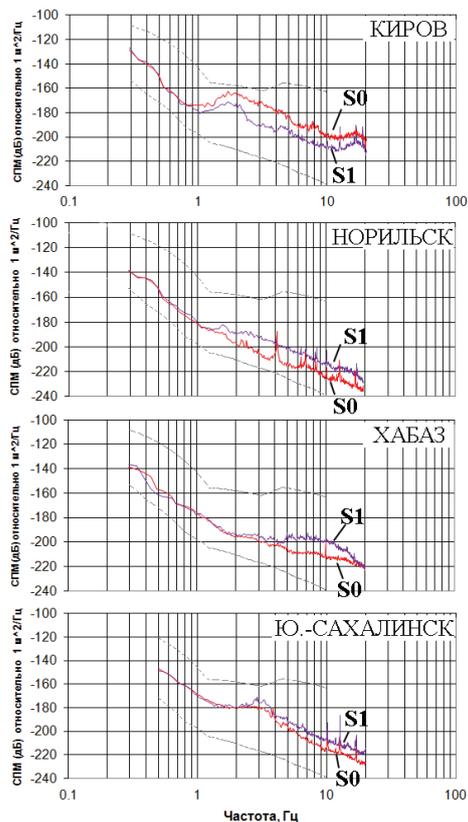


Рис. 8. Сравнение спектральных характеристик микросейсмического шума (по смещению) на альтернативных площадках S0 и S1. На примере выбора площадок Киров, Норильск, Хабаз и Южно-Сахалинск. Серые пунктирные линии соответствуют максимальному и минимальному уровню модели микросейсмического шума Петерсона [Peterson, 1993]

Помимо особенностей микросейсмического шума в интересующей полосе частот, важной характеристикой места наблюдения является качество регистрации сейсмических сигналов, выражаемое в оценках их амплитуд и отношениях сигнал/шум. Сравнительные оценки проводились по данным обработки сейсмических сигналов от землетрясений, одновременно зарегистрированных на альтернативных площадках. Измерения амплитуд сигналов проводились в полосе частот регистрации телесеизмических сигналов 0.8–2.0 Гц и в полосе региональных сигналов 2–4 Гц. Обработка сигнала включала оценку максимальной амплитуды и периода, среднего квадратического отклонения (СКО) для 30-секундного фрагмента шума перед вступлением сигнала, СКО сигнала для временного окна продолжительностью 5 с, и отношение измеренных параметров сигнала и шума на одной площадке к соответствующим данным на другой. При этом учитывалось, что, как правило, различия в эффективности регистрации сигналов в полосе 2–4 Гц определяются различиями уровней шумов. При оценке различий эффективности регистрации сигналов определялась также статистическая значимость дисперсии ошибок измерений.

Примеры результатов подобного анализа показаны на рис. 9, где приведены примеры форм сигналов, зарегистрированных на площадках S0 и S1 в районе станций Норильск и Киров.

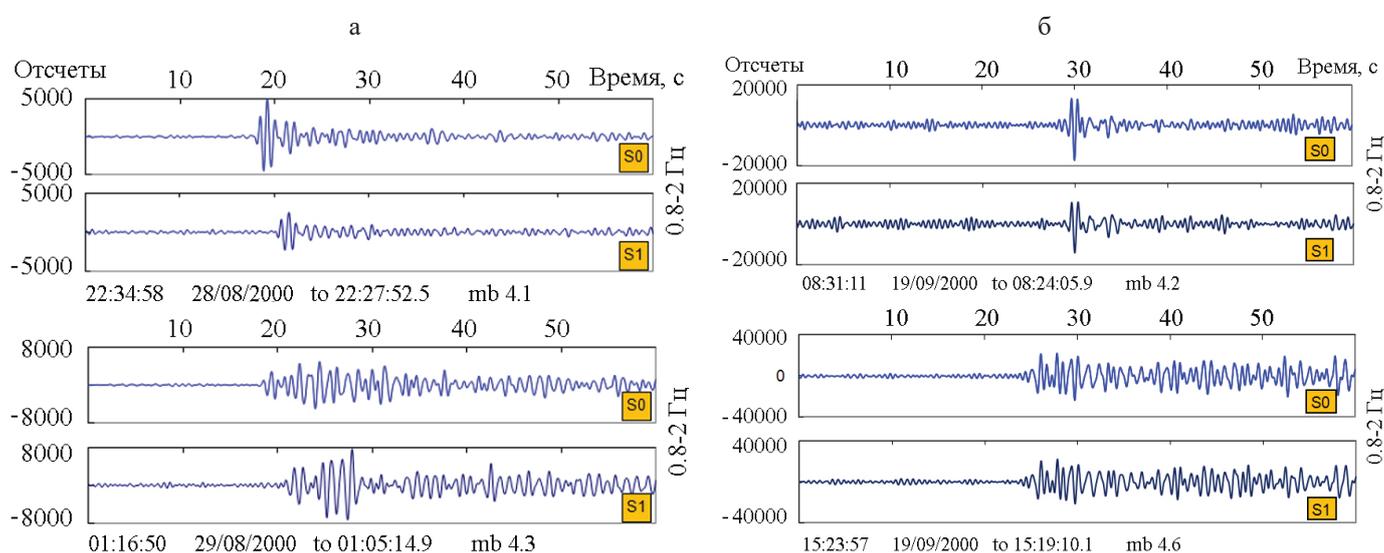


Рис. 9. Сравнение форм сигналов, зарегистрированных на альтернативных площадках S0 и S1; вертикальные компоненты. Норильск (а) – видна изменчивость сигналов, Киров (б) – практически полная идентичность формы

На рис. 9а (Норильск) видно, что наблюдались значительные динамические вариации параметров сигналов: систематическое завышение амплитуд сигналов по одним районам и занижение по другим. Сравнительные оценки проводились по данным обработки сейсмических сигналов от 25 землетрясений, одновременно зарегистрированных на площадках S1 и S0; было показано, что в полосе 0.8–2.0 Гц амплитуды сигналов, а также значения $\lg(A/T)$ на площадке S1 на 0.08 ед. логарифма выше, чем на площадке S0. Здесь речь идет о так называемой «избирательной чувствительности» [Кедров, 2005] определенных мест расположения станций по регистрации сигналов из интересующих регионов. Практика сейсмических наблюдений показывает, что одна и та же станция способна из одного района регистрировать даже очень слабые сигналы, и практически «не видеть» сигналы, имеющие источники на других направлениях. В подобных случаях при переносе станции (например, с площадки S0 на площадку S1 в Норильске) требуется переоценка станционных магнитудных поправок. В другом примере (для разных площадок в районе станции Киров, рис. 9б) хорошо видна полная идентичность форм сигналов, что подтвердило возможность переноса станции с площадки

S0 на площадку S1, предложенную в результате анализа микросейсмического шума, без каких-либо переоценок магнитудных поправок.

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, остаются неизменными.

Основные этапы выбора площадок сейсмических станций для целей Международной системы мониторинга ядерных испытаний по опыту отбора площадок на территории России выглядят следующим образом.

1. Общее описание географических, геологических и инфраструктурных характеристик района размещения будущей станции; предварительный выбор нескольких мест-кандидатов для площадки ее установки на основании полученных описаний. Выбор и подготовка аппаратуры к полевым работам: калибровка сейсмических каналов, оценка степени идентичности характеристик используемой сейсмической аппаратуры (подробнее описано в первой части [Сутулов, Кишкина, 2024]).

2. Выполнение основной задачи – оценка сейсмических характеристик мест-кандидатов на роль площадки для установки сейсмической станции. В требованиях МСМ к месту установки станции фигурирует место, на котором спектральная плотность сейсмического шума является минимальной в выбранном районе, а отношение сигнал/шум, при этом, является наибольшим; средний уровень шума по ускорению не должен превышать значение -135 дБ относительно величины $1 \text{ (м/с}^2\text{)}/\text{Гц}$ на частоте 5 Гц .

Основным критерием проведенных работ должен являться обоснованный выбор площадки для установки сейсмической аппаратуры (сейсмической малобазовой группы или отдельной станции), опирающийся на результаты, полученные в ходе полевых работ. Должны быть сформулированы предложения по выбору аппаратуры (требования МСМ для первичных станций, это частотная полоса не уже чем $0.02\text{--}16 \text{ Гц}$ и динамический диапазон от 120 дБ) и рекомендации по расположению площадки: от результатов анализа геологической и сейсмической информации до обеспечения жизнедеятельности обслуживающего персонала, наличия и характера подъездных путей, обеспечения электроснабжения сейсмической станции, организации надежного канала передачи сейсмической информации и устойчивой связи для обслуживания объекта. При близких характеристиках мест-кандидатов должна выбираться площадка с наименьшими ожидаемыми затратами по размещению, строительству и обеспечению функционирования объекта.

3. На заключительном этапе проводится тестирование станции, её оценка и сертификация. Согласно требованиям Подготовительной комиссии Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний должно быть продемонстрировано, что устройства аутентификации данных и инфраструктура связи установлены и работают должным образом; станция работает с требуемой доступностью данных (в среднем это 98%) и данные могут быть успешно использованы при обработке в Международном центре обработки данных. Сертифицированная станция включается в сеть международного мониторинга и начинает непрерывную сейсмическую регистрацию и передачу данных в МЦД.

Ниже приведена таблица (см. Приложение) с перечнем всех сейсмических станций МСМ на территории России. Отметим, что приведенные сроки сертификации отмечают именно время официального включения станции в сеть МСМ (фактически, начало непрерывной передачи данных в центр обработки), тогда как физическое время работы ряда станций может быть существенно иным. Как, например, для станции Обнинск (ОВН, ГС РАН), которая начала свою работу в 1964 г. , а сертифицирована в качестве станции МСМ в 2009 г.

Заключение

Работы, описанные в предлагаемой статье, проводились на рубеже 20–21 веков, в самом конце девяностых и начале двухтысячных годов. Несомненно, за последние двадцать пять лет появились новые мобильные средства повышенной проходимости, разработаны относительно дешевые модульные конструкции для защиты места установки датчиков от внешних воздействий, упростились методы организации связи и обеспечение электропитанием (существенно подешевели солнечные батареи, появились более емкие и надежные аккумуляторы) и т.п. Для решения задач дискриминации источников сейсмических сигналов все чаще используют методы машинного обучения, включая разработки классификаторов на основе алгоритмов нейронных сетей [Farahani, 2015; Mostafa, Jamal, 2017] или, например, диффузионных карт (низкоразмерные описания многомерных наборов) [Bregman et al., 2020].

Параллельно развиваются и традиционные методики идентификации, которые опираются на изменение/расширение числа регистрирующих станций и характеристик используемой аппаратуры, вовлечение в анализ большого объема данных, что позволяет строить высококачественные модели источника [Gibbons et al., 2022]. С разработкой алгоритма «двойной разности» (*double-difference method*, [Waldhauser, Ellsworth, 2000]), опирающегося на измерения кросс-корреляции и на совместный анализ большого числа событий, появилась возможность уточнения местоположения источника. Многочисленные работы, использующие данный алгоритм, продемонстрировали, что он позволяет определить местоположение источника на порядок (а иногда и на два) точнее, чем классические методы, что играет существенную роль в процессе идентификации событий [Yang et al., 2005; Richards et al., 2006], например, когда речь идет о сейсмических источниках в районе вблизи китайского ядерного полигона Лобнор, которые территориально могут быть как взрывами, так и землетрясениями [Копничев и др., 2001; Waldhauser et al., 2004; Gibbons et al., 2022]. Продолжают развиваться методики группирования сейсмических датчиков. В [Gibbons et al., 2011; Бобров и др., 2015а,б], например, продемонстрировано, что малобазовые группы, сформированные из трехкомпонентных станций, гораздо надежнее справляются с задачей определения природы источника, чем традиционно устанавливаемые конфигурации вертикальных сейсмических датчиков.

Отметим, что современные подходы требуют доступа к архивам волновых форм с хорошо откалиброванных станций, которые долгое время работали в одном и том же месте, чему абсолютно удовлетворяют станции МСМ.

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 особенность и географическую характеристику места установки станции, которые оказывают 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. Причем, полезным при организации любых сейсмических наблюдений вне зависимости от их масштаба, поскольку в основе организации системы МСМ – опыт и экспертная оценка 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.

Станции МСМ на территории России

(по данным https://www.ctbto.org/sites/default/files/2024-12/IMS%20Map_NOVEMBER_2024_Final_Web.pdf
и <http://www.gsras.ru/new/struct/>)

№	Код станции	№ в табл. ДВЗЯИ	Имя станции	Район расположения	Широта (N)	Долгота (E)	Тип станции	Год сертификации*
Станции первичной сейсмической сети								
1	KBZ	32	Хабаз / Khabaz	Кавказ (Кабардино-Балкария)	43.7	42.9	3-комп.	2008
2	ZAL	33	Залесово / Zalesovo	Алтайский край	53.9	84.8	группа	2006
3	NRI	34	Норильск / Norilsk	Норильск (Красноярский край)	69.3	87.6	3-комп.	2010
4	PDY	35	Пеледуй / Peleduy	Якутия	59.6	112.6	группа	2022
5	PET	36	Петропавловск-Камчатский / Petropavlovsk-Kamchatskiy	Камчатка	53.1	157.7	группа	2006
6	USK	37	Уссурийск / Ussuriysk	Приморский край	44.2	132.0	группа	2008
Станции вспомогательной сейсмической сети								
7	KIRV	82	Киров / Kirov	Киров	58.6	49.4	3-комп.	2012
8	KIVB	83	Кисловодск / Kislovodsk	Ставропольский край	44.0	42.7	группа	2008
9	OBN*	84	Обнинск / Obninsk	Подмосковье	55.1	36.6	3-комп.	2009
10	ARTI	85	Арти / Arti	Урал (Свердловская обл.)	56.4	58.4	3-комп.	2010
11	SEY	86	Сеймчан / Seymchan	Магаданская обл.	62.9	152.4	3-комп.	2007
12	TLY	87	Талая / Talaya	Байкал	51.7	103.6	3-комп.	2009
13	YAK	88	Якутск / Yakutsk	Якутия	62.0	129.7	3-комп.	2010
–	URG	89**	Ургал / Urgal	Хабаровский край	51.1	132.3	3-комп.	–
14	KLR	89	Кульдур / Kuldur	Еврейская автономная обл.	49.2	131.8	3-комп.	2010
15	BILL	90	Билибино / Bilibino	Чукотка	68.0	166.4	3-комп.	2021
16	TIXI	91	Тикси / Tiksi	Якутия	71.6	128.9	3-комп.	2011
17	YSS	92	Южно-Сахалинск / Yuzhno-Sakhalinsk	о. Сахалин	47.0	142.8	3-комп.	2023
18	MA2	93	Магадан / Magadan	Магадан	59.6	150.8	3-комп.	2023
–	ZIL	94**	Зилим / Zilim	Башкирия	53.9	57.0	3-комп.	–
19	BELG	94	Белогорное / Belogornoe	Саратовская обл.	52.4	47.6	3-комп.	2014

* – официальное время начала работы в качестве станции МСМ; может не совпадать с физическим временем создания/началом работы станции (как, например, станция Обнинск OBN, которая начала работу в 1964 г., а сертифицирована для передачи данных в МСМ с 2009 г.);

** – станции, выбранные экспертами для проектируемой МСМ и включенные в текст Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), однако, в процессе обследования мест-кандидатов, перенесенные в другой район.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200570-5) и Министерства обороны РФ.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам и редакции за внимательное прочтение статьи и весьма ценные замечания.

Список литературы

- Беседина А.Н., Тубанов Ц.А.* Микросейсмы как инструмент геофизических исследований. Состояние вопроса // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 12–32. <https://doi.org/10.31857/S0203030623700116>
- 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. 2015. Т. 51. № 2. С. 5–30.
- 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. 2015. Т. 51. № 3. С. 22–46.
- 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.
- Отчет. «Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции AS82 «Киров», Российская федерация». Москва. НИИИТ. 2000.
- Отчет. «Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции PS34 «Норильск», Российская федерация». Москва. НИИИТ. 2000.
- Отчет. «Обследование площадки для размещения трехкомпонентной сейсмической станции AS92 «Южно-Сахалинск», Российская федерация». Москва. НИИИТ. 2001.
- Отчет. «Обследование площадки для размещения сейсмической станции AS94 «Зилим», Российская федерация». Москва. НИИИТ. 1999.
- Отчет. «Обследование площадки для размещения сейсмической станции PS32 «Хабаз», Российская федерация». Москва, НИИИТ. 1999.
- Копничев 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.
- Суворова Н.И.* О частотных спектрах сейсмических колебаний, возбуждаемых промышленными взрывами // Записки Горного института. 1981. Т. 89. С. 47–49.
- 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. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_162
- Baumgardt D.R., Ziegler K.A.* Spectral evidence for source multiplicity in explosions: application to regional discrimination of earthquakes and explosions // Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 78 (5). 1988. P. 1773–1795.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02452-w>
- 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>
- Farahani J.V.* Discrimination of Quarry Blasts and Microearthquakes Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems in the Tehran Region. 2015. Vol. 38. P. 162–168. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128942399>

Gibbons S.J., Schweitzer J., Ringdal F., Kvaerna T., Mykkeltveit S., Paulsen B. Improvements to Seismic Monitoring of the European Arctic Using Three-Component Array Processing at SPITS // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 101 (6). P. 2737–2754. <https://doi.org/10.1785/0120110109>

Gibbons S.J., Chaves E.J., Fisk M. The 27 February 2022 LopNor Earthquake: Detectability, Location, and Discrimination // The Seismic Record. 2022. Vol. 2(2). P. 137–147. <https://doi.org/10.1785/0320220018>

McNamara D.E., Buland R.P. Ambient noise levels in the continental United States // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2004. Vol. 94 (4). P. 1517. <http://dx.doi.org/10.1785/012003001>

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.

Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise: Open-file report №93-322. 1993. U.S. Department of Interior. U.S. Geological Survey.

Richards P.G., Waldhauser F., Schaff D., Kim W.Y. The applicability of modern methods of earthquake location // Pure and Applied Geophysics. Vol. 163. P. 351–372. <https://doi.org/10.1007/S00024-005-0019-5>

Smith A.T. Seismic site selection at high frequencies: a case study. April 22. 1987. UCID-21047.

Smith A.T. High-frequency seismic observations and models of chemical explosions: implications for the discrimination of ripple-fired mining blasts // Bull. Seism. Soc. Am. 79. 1989. P. 1089–1110.

Waldhauser F., Ellsworth W. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California // Bulletin of the Seismological Society of America. 2000. Vol. 90 (6). P. 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>

Waldhauser F., Schaff D., Richards P.G., Kim W.-Y. LopNor revisited: Underground nuclear explosion locations, 1976–1996, from double-difference analysis of regional and teleseismic data // Bull. Seismol. Soc. Am. 94. 2004. P. 1879–1889. <https://doi.org/10.1785/012003184>

Yang Z. X., Waldhauser F., Chen Y.T., Richards P.G. Double-difference relocation of earthquakes in central-western China, 1992–1999 // Journal of Seismology. 2005. Vol. 9 (2). P. 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10950-005-3988-z>

SEISMIC CHARACTERISTICS OF SITES FOR IMS STATIONS IN RUSSIA. A RETROSPECTIVE

© 2025 S. B. Kishkina^{1,*}, E. A. Sutulov²

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*12 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Sergiev Posad, Russia*

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

The article is dedicated to the memory of Professor A. B. Peshkov, scientific director of the work on the organization of ISM stations on the territory of the Russian Federation.

In recent decades, seismic observations have been actively expanding all over the world. They are used in a very wide range of tasks: from studying mega-earthquakes over vast areas of subduction zones to assessing local micro-earthquakes in the area of an individual mine or recording weak events accompanying hydrocarbon extraction. More and more temporary and permanent seismic systems are appearing in Russia to monitor nuclear industry facilities and control man-made seismicity in mining areas. The article describes the work that was carried out at the turn of the century during the selection of locations for seismic stations, which later became part of the International Monitoring System (IMS) organized to control nuclear tests. The main principles and algorithms for selecting locations for seismic stations are considered based on the analysis of the experience of work on selecting sites for IMS stations in Russia; some seismic characteristics of the sites are given. A step-by-step analysis of the basic approaches used in the organization of the IMS seismic network may be useful in creating new observation systems to solve various problems.

Keywords: seismic station, International Monitoring System, CTBT, seismometer installation site, microseismic noise.