

ПРЕИМУЩЕСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ПРЯМОЙ УСТАНОВКИ В ГРУНТ

Разинков О.Г.¹, Сидоров-Бирюков Д.Д.¹, B. Townsend², T. Parker², G. Bainbridge², R. Greiss²

¹ООО НПК «Вулкан» г. Москва, orazinkov@vulcan-inc.ru

²Nanometrics Inc., Оттава, Канада, contact-us@nanometrics.ca

Введение

По типу установки сейсмометры принято разделять на классические, сконструированные для размещения на постаментах в оборудованных шахтах, и скважинные – для инсталляции в глубоких обсаженных скважинах. Классические широкополосные прецизионные сейсмометры требуют больших затрат для строительства шахт или подвалов, возведения массивных постаментов и обеспечения необходимого температурного режима помещений. Скважины общепринято считаются самой тихой средой для инструментов с низким уровнем собственного шума, однако приборы со скважинным замком дороже классических сейсмометров, их установка сопряжена с существенными затратами на бурение и подготовку скважины. Промежуточным вариантом инсталляции является прямая установка сейсмических инструментов в грунт, а также в неглубокие обсаженные и необсаженные скважины. Существуют отдельные сейсмометры различных производителей, которые могут быть установлены подобным образом, однако только компания Nanometrics Inc. (Канада) имеет специально разработанную полную линейку данных приборов для прямой установки в грунт (Posthole): от форс-балансных акселерометров до лучших сверхширокополосных сейсмометров для глобальной сейсмической сети – Trillium 360 секунд [2]. Приборы данного исполнения имеют преимущества как классических, так и скважинных сейсмометров: они выполнены в прочных водонепроницаемых корпусах из нержавеющей стали с классом защиты IP68, могут работать на глубинах до 300 метров, поддерживают автоматическое центрирование при углах отклонения от вертикали до 5 – 10 градусов, не используют дорогие скважинные замки, а среда установки сама обеспечивает максимальную фиксацию и температурную стабилизацию. Среди этих приборов существуют и уникальные модели, в частности, универсальный Horizon подходит также для установки на постаменте, а комбинированный инструмент Cascadia (широкополосный сейсмометр и акселерометр) обеспечивает суммарный динамический диапазон в 200 дБ и гарантирует регистрацию как слабых, так и сильных сейсмических событий [6].

Типичные недостатки ряда сейсмических приборов

В последние годы уровень требований сейсмологов к инструментальной базе существенно возрос, что связано с реализацией значимых в глобальном масштабе проектов с различными условиями использования аппаратуры. При этом в ряде случаев уровень разработки инструментов не соответствует потребностям времени и реализуемым задачам, и сейсмологи вынуждены применять импровизированные решения по размещению приборов в более широких диапазонах условий и большим количеством. Поэтому существенной задачей производителей аппаратуры является улучшение конструкции инструментов для предоставления пользователям больших возможностей при снижении стоимости установки и обслуживания сейсмических приборов.

Несмотря на существенное улучшение качества сейсмометров и регистрирующей аппаратуры в последнее десятилетие, мы по-прежнему отмечаем их отдельные недостатки. В частности, корпуса и разъемы могут быть недостаточно прочными или из корродирующих материалов, не рассчитаны на избыточное давление при погружении прибора в воду или при контакте с такими материалами, как песок или грунт, не имеют магнитного экранирования и не защищены от влияния магнитного поля Земли. Многие приборы имеют ограниченную стойкость к низким температурам и к температурным градиентам, имеют небольшие рабочие углы наклонов и динамический диапазон, недостаточный для зон сильных землетрясений. Ряд датчиков не обладает удобным цифровым интерфейсом и имеет только аналоговый выход. Многие датчики не обеспечивают достаточную защиту от нестабильного напряжения питания, они спроектированы как отдельные приборы, а не полностью интегрированная часть сейсмической станции, в частности, сейсмометры не могут предоставлять детальный статус (метаданные и идентификаторы) и имеют ограниченную поддержку производителей.

Конструктивные решения сейсмических приборов для прямой установки в грунт

Наглядным примером эволюции конструкции современных сейсмических станций является схема установки станций на Аляске [3, 7] (рис 1.).

Климат и география региона потребовали масштабной реструктуризации станции для достижения требуемого качества и достоверности данных. Установка датчиков в грунт обеспечила оптимальное качество данных, при этом для развертывания станций требуется только легкий бур, который легко транспортировать вертолетом.

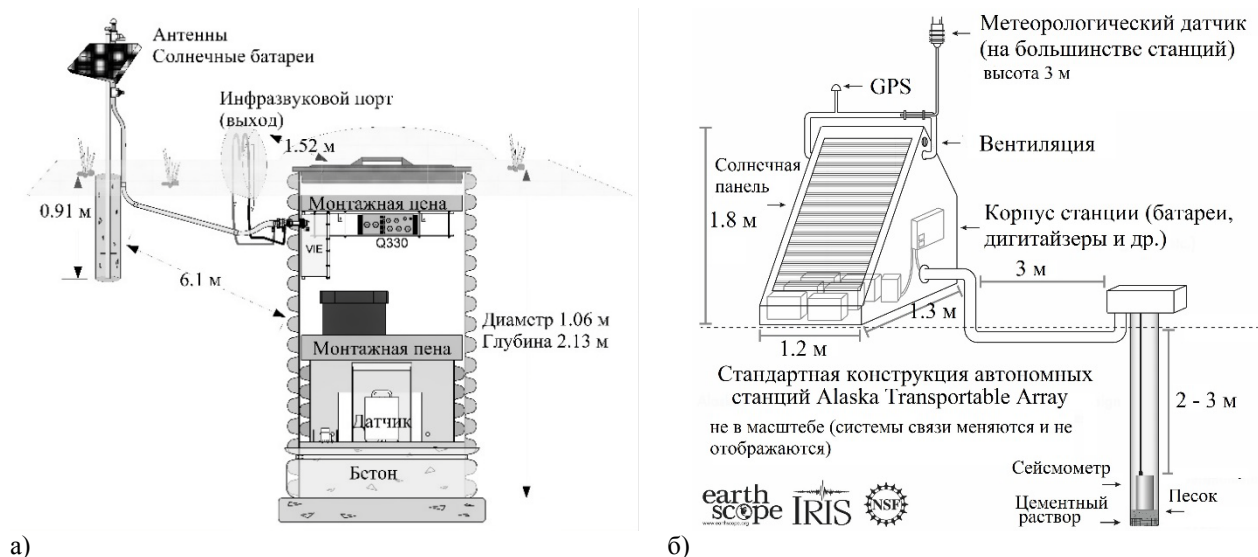


Рис. 1. Эволюция оборудования сейсмостанций в проекте EarthScope [4]: (а) – конструкция укрытия, использовавшаяся первые 8 лет наблюдений, многие инструменты, установленные подобным образом, оказались затоплены; (б) – новая схема установки станции с использованием датчика posthole. Данный вариант оборудования значительно понизил порог шума горизонтальных компонент сигнала и решил проблему термостабилизации в полярных областях

Разработки компании Nanometrics Inc.

Сейсмологические приборы компании Nanometrics Inc. охватывают полный спектр широкополосного оборудования как для использования на временных станциях, так и для стационарных многофункциональных станций [5]. Разработанные приборы имеют разные варианты исполнения: для установки на постамент и для прямой установки в грунт и в скважины, из которых они могут быть легко извлечены и установлены вновь. Данные приборы эффективно используются в районах Крайнего Севера [1, 7].

Рассмотрим более подробно инструменты для прямой установки в грунт (Posthole). Они поддерживают три варианта инсталляции:

- 1) Поверхностная установка: в неглубокую яму или необсаженную скважину глубиной обычно от 1 до 3 м, засыпаемую грунтом.
- 2) Скважинная установка: используется скважина глубиной примерно от 2 до 10 м, обсаженная ПВХ или стальной трубой и частично засыпанная песком.
- 3) Глубинная скважинная: стальная сухая обсаженная скважина глубиной до 300 м. Установка производится также в песок.

Прямая установка в грунт эффективно решает задачу термоизоляции и снижения уровня шума и достаточно проста по своей реализации.

Многофункциональные цифровые сейсмометры серии Meridian

Одним из примеров интегрированных систем для прямой установки в грунт является серия Meridian: широкополосный сейсмометр со встроенным дигитайзером.

В приборах этой серии реализованы все опции телеметрии, они имеют широкий диапазон рабочих углов наклона и прочный герметичный корпус из нержавеющей стали со степенью защиты IP68 для любых условий окружающей среды, что делает установку и обслуживание сейсмостанций максимально простыми и удобными. Производятся два типа приборов этой серии: компактный ($D = 97$ мм) и полноразмерный ($D = 143$ мм) с собственным шумом ниже модели Петерсона (NLNM) в

диапазоне от 100 с до 10 Гц (модель 120 секунд) (рис. 2). Оба типа подключаются к миниатюрному модулю диагностики и управления, который находится на поверхности и обеспечивает подключение антенны приемника точного времени, питания и телеметрии, а также имеет герметичный картридж с SD картой для данных с возможностью ее замены без прерывания записи. Конструкция системы подвеса масс сейсмометра очень надежна и не требует арретирования. Приборы способны регистрировать сейсмический сигнал амплитудой до 27 мм/с в диапазоне от 10 секунд до 10 Гц (модели MC20/120) и 0.17g на более высоких частотах. Электропитание в автономном режиме составляет всего 1 Вт для компактной версии инструмента.

Дигитайзер инструмента Meridian полностью конфигурируется с использованием интуитивно понятного веб интерфейса. Прибор поддерживает оцифровку на одной или двух частотах отсчетов до 2000 отс/с в режиме потока и до 500 отс/с в режиме постоянного архивирования, имеет универсальную систему автоматического детектирования событий с настраиваемыми полосовыми фильтрами, обеспечивает доступ к данным в формате MiniSEED при помощи съемной SD карты или локального Ethernet. Прибор может регистрировать статистику пиковых значений сигналов, включая ускорение, скорость и смещение, поддерживает различные опции связи в реальном времени, в том числе потоки данных по протоколу SeedLink.

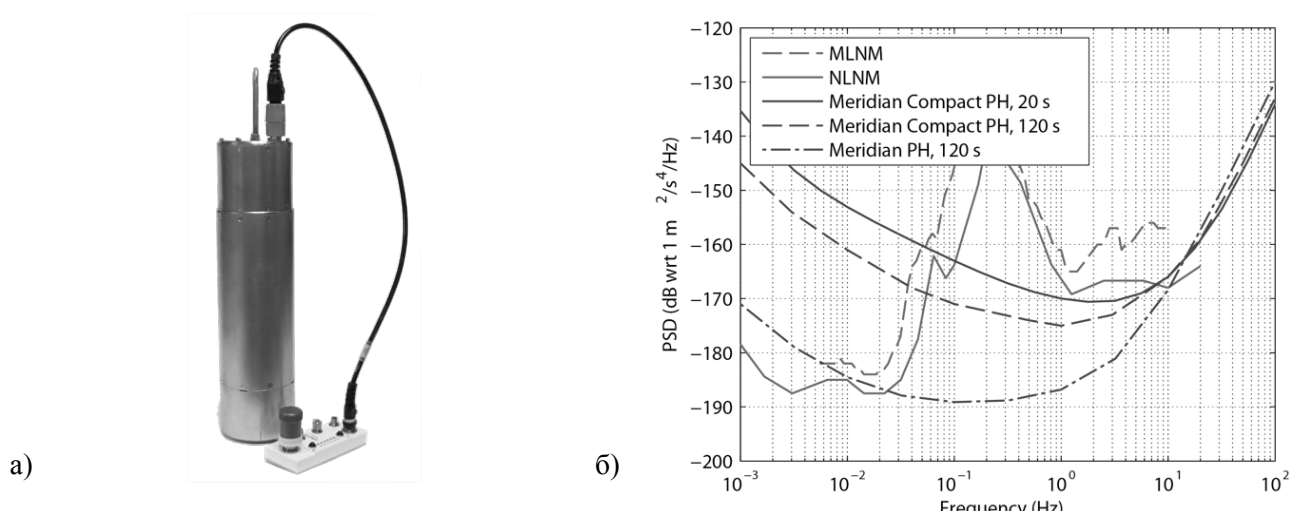


Рис. 2. Широкополосный сейсмометр Meridian Posthole: (а) – внешний вид; (б) – уровни собственного шума моделей Meridian Compact 20с и 120с, Meridian PH 120с относительно моделей Петерсона NLNM и MLNM

Универсальный сейсмометр Trillium Compact

Один из самых известных в мире широкополосных сейсмометров Trillium Compact имеет исполнение Posthole в водонепроницаемом корпусе из нержавеющей стали и при весе 3.3 кг подходит для прямой установки в грунт и в скважины, в том числе необорудованные, может быть установлен в снег или вморожен в лед. Инструмент компактен и прост в инсталляции, не требует центрирования масс и арретирования, имеет широкий рабочий диапазон углов наклона – до 10° (модель 20 с). При этом обладает высоким динамическим диапазоном в полосе частот от 120 с до 100 Гц, при 1 Гц – более 152 дБ.

Этот универсальный прибор широко используется для решения различных задач сейсмологии: в региональных, национальных и глобальной сейсмических сетях, для изучения афтершоков, мониторинга наведенной сейсмичности, в том числе нефтяных и газовых месторождений, в инженерной сейсмологии.

Комбинированный прибор Cascadia

Серия инструментов Cascadia – это комбинация датчиков для сильных и слабых движений в одном блоке, устанавливаемом как единый инструмент. Разработка Cascadia уменьшает размеры оборудования сейсмостанции без потери ее производительности, имеет высокую наработку на отказ – более 100 лет, что является существенным фактором в процессе будущей эксплуатации станции.

Конструктивно Cascadia объединяет сейсмометр Trillium Compact Posthole и акселерометр класса А – Titan Posthole. Cascadia имеет сверхширокий суммарный динамический диапазон (более 200 дБ) и позволяет регистрировать как сильные, так и слабые движения с высокой точностью и производительностью (рис. 3). Прибор допускает установку в агрессивной среде, устойчив к

затоплению, может быть установлен непосредственно в грунт, что делает его установку простой и быстрой.

Cascadia имеет ряд преимуществ как в плане улучшенной производительности, так и в части удобства установки и обслуживания. Комбинированные приборы этого типа выпускаются в нескольких вариантах, отличающихся диаметром корпуса, технологиями сейсмометра и диапазоном акселерометра.

Форм-факторы: модель Compact Posthole – диаметр 97 мм; модель Posthole с автоматическим выравниванием – диаметр 143 мм; модель Borehole – диаметр 143 мм, со скважинным замком.

Технологии сейсмометра: компактный, портативный, широкополосный – 120 секунд с диапазоном углов $10^\circ - 20^\circ$ с (в компактном форм-факторе); полноразмерный, класс observatory – 120 секунд (в варианте posthole или borehole); класс GSN – 360 секунд (в варианте posthole или borehole).

Диапазон акселерометра, задаваемый дистанционно: $\pm 4g$, $\pm 2g$, $\pm 1g$, $\pm \frac{1}{2}g$, $\pm \frac{1}{4}g$.

Для удобства установки этого датчика имеется электронный пузырьковый уровень в пользовательском интерфейсе регистратора, позволяющий легко задать правильное положение компактного датчика в неосвещенной скважине при установке и удаленно проверить наклон впоследствии в любой момент времени.

Производительность и эксплуатационные преимущества:

- регистрация как слабых телесейсмических событий, так и сильных локальных землетрясений без зашкаливания, поскольку все сигналы находятся в пределах объединенного динамического диапазона двух датчиков – сейсмометра и акселерометра;
- все шесть каналов абсолютно точно взаимно ориентированы;
- уровень фонового шума (от деятельности человека, температурный, вследствие наклона датчика) снижается даже при неглубокой установке;
- прибор может быть легко извлечен из скважины.

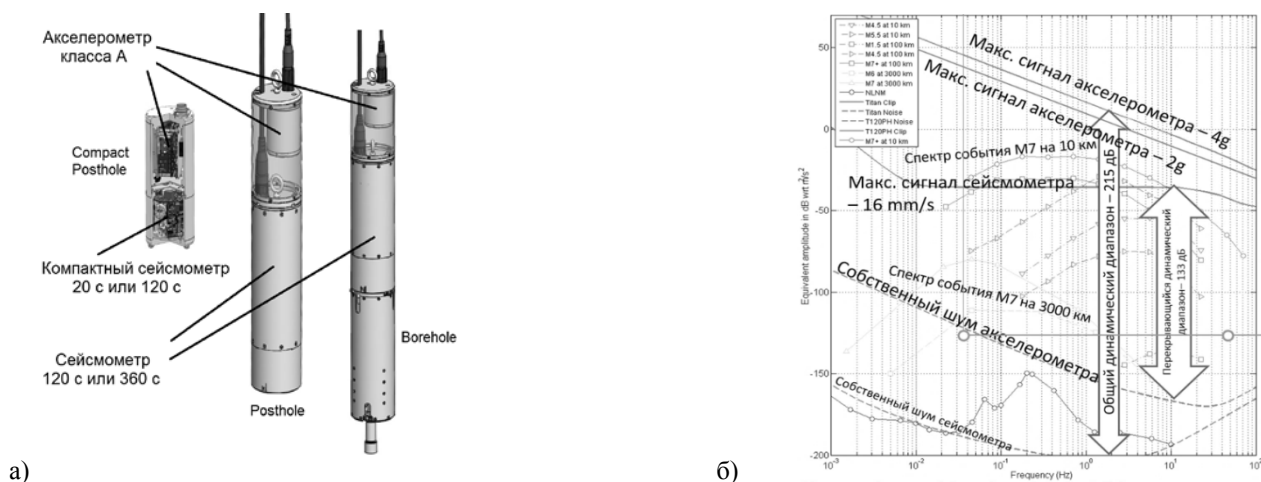


Рис. 3. Инструмент Cascadia: (а) – варианты исполнения; (б) – графическое представление комбинированного динамического диапазона, показывающее максимально возможный регистрируемый сигнал, минимально различимый сигнал (уровень собственного шума), типичные спектры землетрясений с различными магнитудами на различных удалениях, модель Петерсона (NLNM), перекрывающийся и общий динамический диапазоны.

Cascadia позволяет получить максимум результатов и минимизировать затраты. Прибор подходит для любой сейсмической сети региона, где возможны сильные локальные события. Сейсмометр регистрирует много слабых землетрясений, что улучшает понимание геодинамики региона с течением времени, а акселерометр гарантирует запись редких, но важных сильных сейсмических событий, амплитуда которых выходит за диапазон регистрации сейсмометра.

Результаты тестирования Cascadia

Датчик Cascadia Compact с шестиканальным регистратором Centaur были размещены рядом со станцией Y22D Earthscope TA на базе IRIS PASSCAL Instrument Center в Socorro, New Mexico. Датчик был установлен в скважину глубиной ~ 1 м. Проведена серия тестов и долговременные измерения, начиная с весны 2017 года.

Собственные шумы станции Cascadia Compact SOC1 сравнимы с собственными шумами референтных датчиков на станции Y22D Earthscope TA. Регистрация нескольких телесейсмических событий подтвердила ожидаемый уровень когерентности записей акселерометра и сейсмометра, объединенных в инструменте Cascadia (рис. 4).

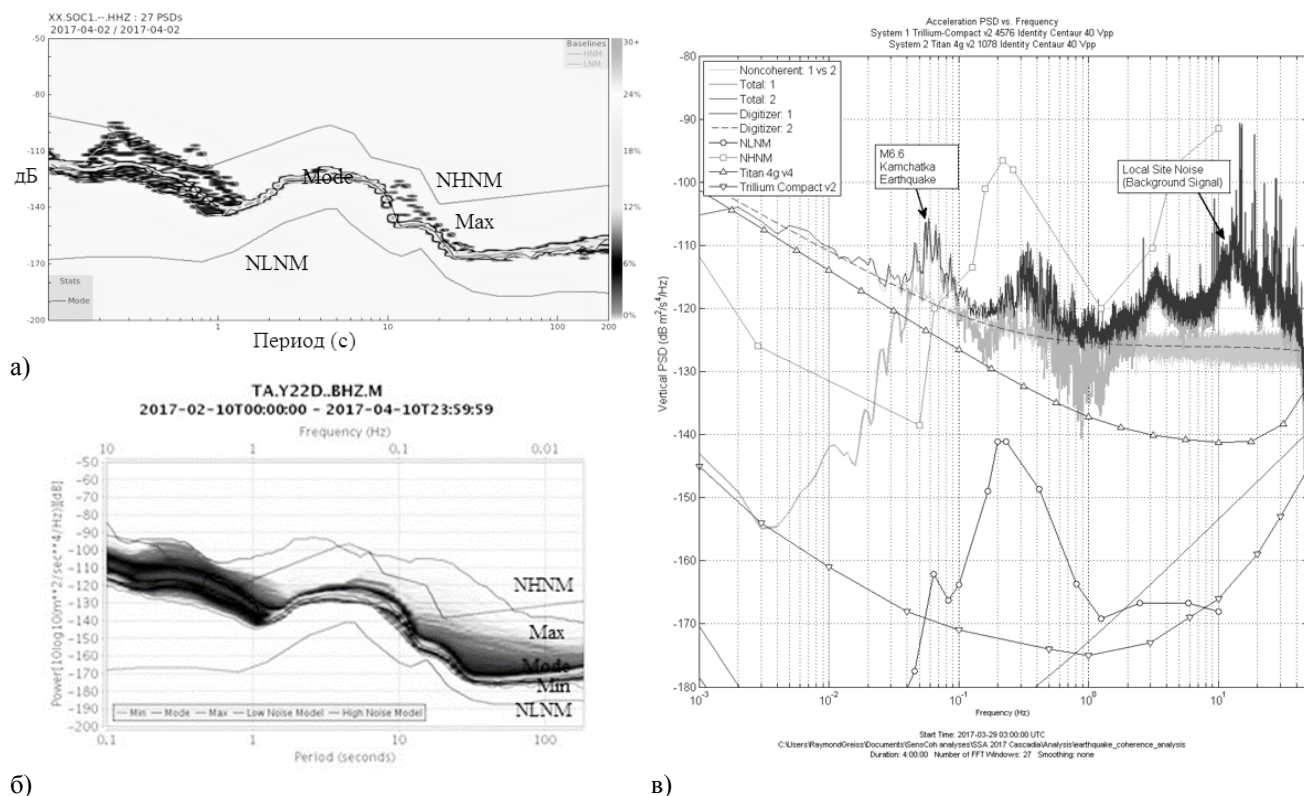


Рис. 4. Результаты тестирования Cascadia: (а) – собственные шумы временной станции Cascadia Compact SOC1 в сравнении с опорной стационарной станцией (б); (в) – сравнение спектров землетрясения и согласованность записей акселерометра Titan и сейсмометра Compact, на примере телесейсмического события магнитудой $M=6.6$ (29 марта 2017, 81 км от Усть-Камчатска)

Заключение

Широкополосные сейсмические инструменты для прямой установки в грунт занимают отдельную нишу в сообществе прецизионных приборов для сейсмологии. Обладая высокими характеристиками классических широкополосных сейсмометров в сочетании с максимальной надежностью скважинных приборов и их устойчивостью к условиям окружающей среды, они предоставляют пользователям высокотехнологичное и экономически эффективное решение для широкого круга задач современной сейсмологии.

Список литературы

1. Виноградов Ю. А., Пятунин М. С. Сейсмологический мониторинг на Северном Ямале. Первые результаты // в материалах XII Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных». Алматы 2017. С. 92-95
2. Интернет-ресурс <http://www.nanometrics.ca/seismology/products/trillium-360-posthole> по состоянию на 11.09.2017
3. Интернет-ресурс <http://www.usarray.org/alaska> по состоянию на 11.09.2017
4. Интернет-ресурс <http://www.earthscope.org> по состоянию на 11.09.2017
5. Интернет-ресурс <http://www.vulcan-inc.ru/seismic-equipment/product-documents-nanometrics> по состоянию на 11.09.2017
6. Parker T., B. Townsend, A. O. Moores, G. S. Bainbridge, D. Easton. Multi-Use Seismic Stations for Earthquake Early Warning // в материалах конференции American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016. San Francisco: 2016. С. #S11D-2503
7. Parker T., Winberry P., Huerta A., Bainbridge G., Devanney P.. Direct Burial Broadband Seismic Instrumentation that are Rugged and Tilt Tolerant for Polar Environments // в материалах конференции EGU General Assembly 2016. Vienna: 2016. С. 17971