

Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза*

П. А. Дергач¹, А. В. Яблоков^{1,2}, С. С. Полозов¹, Г. Ю. Зобнин^{1,2}, А. А. Дучков¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3,

² Новосибирский государственный университет, Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Для цитирования: Дергач, П. А., Яблоков, А. В., Полозов, С. С., Зобнин, Г. Ю., Дучков, А. А. (2024). Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 237–250. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.202>

Исследование посвящено портативной вибрационной установке для генерации поперечных сейсмических волн в диапазоне частот от 5 до 200 Гц, сконструированной в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГТ СО РАН). РАН на основе серийных низкочастотных акустических преобразователей. В статье описана конструкция установки и представлены результаты опытно-методических работ с источником на тестовом сейсмическом полигоне для сопоставления с ударным источником поперечных волн (встречные удары кувалдой по стенкам траншеи). Анализ экспериментальных данных показал, что даже при среднем уровне шумов (постоянный ветер 5–10 м/с и строительные работы на расстоянии около 200 м от профиля) удается уверенно проследить преломленные волны на удалении до 100 м и более, обеспечивая значение соотношения сигнал/шум 5 и выше. Чтобы достичь такого значения, достаточно излучать линейный СВИП-сигнал длительностью 60 с и обеспечить развертку частоты от 20 до 100 Гц. Разработанный источник поперечных волн может использоваться при инженерных работах методами преломленных волн, многоканального анализа поверхностных волн Лява (MALW), а также отраженных волн на SH-волнах (МОВ ОГТ). Последние два метода зарекомендовали себя при малоуглубинных исследованиях инверсных разрезов, что крайне актуально при работах на мерзлых грунтах в северных регионах, так как метод преломленных волн (МПВ) в этом случае малоэффективен, а использование вибрационного источника поперечных волн позволяет значительно подавить поверхностные волны либо полностью от них избавиться.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, вибрационный источник, поперечные волны, метод преломленных волн, низкочастотный акустический преобразователь, СВИП-сигнал.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00237, руководитель А. А. Дучков).

1. Введение

Технологии вибрационного возбуждения сейсмических волн начали активно развиваться и повсеместно применяться в практике сейсморазведочных наблюдений со второй половины XX в. (Crawford et al., 1960; Чичинин, 1965; Шнеерсон и Майоров, 1980; Кострыгин, 1990; Rozemond, 1996). Безусловными преимуществами вибрационных источников являются возможность генерации сигналов в контролируемом частотном диапазоне и хорошая повторяемость наблюдений. Тем не менее в малоглубинной сейсморазведке данный способ до сих пор не нашел широкого применения. Это связано прежде всего с большим весом (порядка 100 кг) и габаритами, а также сложностью конструкции существующих вибрационных установок (Brodic et al., 2019).

В настоящее время расширяется как список задач, которые решаются с использованием малоглубинной сейсморазведки, так и количество применяемых методов. Кроме стандартного метода преломленных волн (МПВ) на продольных волнах, широкое распространение получил метод многоканального анализа данных поверхностных волн Релея (MASW) (Park et al., 1999; Yablokov et al., 2021). Также используются многоканальный анализ данных поверхностных волн Лява (MALW) и метод отраженных волн (МОВ ОГТ) на SH-волнах (Melnikov et al., 2010).

Особую актуальность применение вибрационных источников приобретает при возбуждении поперечных S-волн, так как генерация продольных волн не вызывает значительных проблем. Для этих целей, как правило, используют ударный источник (кувалду), которым наносят встречные удары по стенкам специально подготовленной траншеи либо торцам шпалы, пригруженной автотранспортом. Недостатком такого подхода является необходимость подготовки траншеи, что не всегда возможно, а также сложность обеспечения хорошего прижима шпалы к грунту. Кроме того, могут возникнуть трудности с обеспечением идентичности встречных воздействий и дальнейшим вычитанием сейсмограмм, а также с линейными размерами источника, превышающими расстояние между соседними сейсмоприемниками.

В работе (Dean et al., 2019) была продемонстрирована возможность использования низкочастотного акустического преобразователя Buttkicker LFE (рис. 1) для генерации продольных волн в частотном диапазоне от 5 до 200 Гц. Однако общий вес описанной вибрационной установки, укомплектованной четырьмя излучателями, превышает 80 кг, что делает ее использование проблематичным при инженерных работах со сложным рельефом и при отсутствии дорог.



Рис. 1. Низкочастотный акустический преобразователь Buttkicker LFE. Фото с официального сайта производителя. Доступно на: <https://thebutt kicker.com/>. [Дата доступа 01.11.2023]

В работе (Yablokov et al., 2022) описана вибрационная установка для генерации продольных и поверхностных волн, сконструированная в ИНГГ СО РАН. Приведено детальное описание конструкции вибрационной установки, этапов контроля опорного сигнала аудиоустройства, усилителя мощности и низкочастотного преобразователя. В результате тестов была определена функция зависимости громкости сигнала от частоты, благодаря которой не происходит ударов инерционной массы преобразователя о корпус и искажений выходного сигнала с усилителя мощности. Кроме того, предоставлены результаты полевого тестирования СВИП-сигналов с различной частотной разверткой и выполнена обработка зарегистрированных данных с использованием метода многоканального анализа данных поверхностной волны Релея (MASW).

Данное исследование является развитием полученных ранее результатов. Вес и габариты установки были уменьшены за счет использования 50-вольтовых аккумуляторных батарей без дополнительных блоков питания и инвертора, а излучатели установлены в горизонтальной плоскости. Далее приведено описание конструкции установки, представлены результаты полевых работ с источником на тестовом профиле для сопоставления с ударным источником поперечных волн (встречные удары кувалдой по стенкам траншеи), а также обоснование оптимальной технологии проведения полевых работ.

2. Описание вибрационной установки

Разработанная вибрационная установка состоит из трех основных частей:

- 1) двух излучателей, смонтированных в металлическом корпусе с грунтозацепами (при необходимости их количество можно увеличить);
- 2) силового блока, состоящего из усилителей акустического сигнала и аккумуляторных батарей с напряжением 48–50 В;
- 3) аудиоустройства для воспроизведения опорного сигнала и синхроимпульса.

Основой вибрационной установки по-прежнему является низкочастотный акустический преобразователь Butt kicker LFE, в табл. 1 приведены его основные технические характеристики.

Изначально акустический преобразователь Butt kicker LFE предназначен для монтажа в вертикальном положении. Чтобы избежать возможных искажений амплитуды выходного сигнала, связанного с несбалансированностью движения подвижной

Таблица 1. Основные технические характеристики низкочастотного акустического преобразователя Butt kicker LFE

Параметр	Значение
Частотный диапазон, Гц	5–200
Допустимая входная мощность, Вт	400–1500
Номинальное сопротивление, Ом	4
Габаритные размеры (В × Ш), см	13.65 × 13.65
Общий вес, кг	5
Вес подвижной массы (сердечника), кг	1.48

Примечание. Информация получена с официального сайта производителя <https://thebuttkicker.com/>.

массы в горизонтальной плоскости, излучатели были установлены на противоположных стенках металлического корпуса и подключены к усилителям в противофазе. Грунтозацепы, представляют собой металлические уголки, приваренные к прямоугольным пластинам. Они жестко закреплены к дну металлического корпуса при помощи металлических винтов таким образом, чтобы выступающие фрагменты использовались для обеспечения прижатия всей установки к грунту путем применения внешней нагрузки. В качестве такой нагрузки может быть задействован человек. Схема монтажа излучателей на металлический корпус виброисточника приведена на рис. 2. В таком исполнении масса всей конструкции не превышает 15 кг.

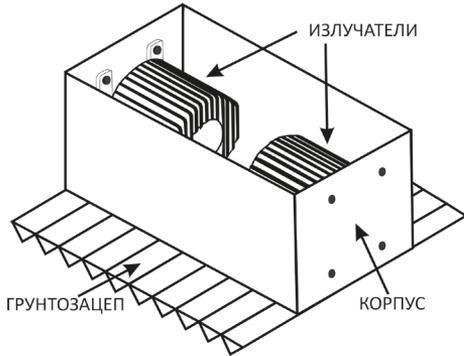


Рис. 2. Схема монтажа акустических преобразователей ButtKicker LFE (излучателей) на металлический корпус с грунтозацепами



Рис. 3. Фотографии, демонстрирующие процесс работы с вибрационной установкой в полевых условиях. Слева — вибрационная установка в сборе с блоком синхронизации вспомогательных каналов (БСВК) сейсмостанции SCOUT. Справа — процесс работы на профиле

Силовой блок состоит из аккумуляторных батарей (48 В) и цифровых усилителей мощностью 250 Вт из расчета по одному комплекту на каждый излучатель, упакованных в защищенный пластиковый кейс. В текущей компоновке для обеспечения необходимого напряжения 48–50 В были использованы свинцово-кислотные аккумуляторы для источников бесперебойного питания (12.5 В, 7.2 А · ч, 2.4 кг), соединенные последовательно по четыре штуки. Таким образом, масса силового блока с восемью аккумуляторными батареями и двумя усилителями составила 22 кг.

Для генерации опорного СВИП-сигнала и запуска сейсмостанции в данном исследовании используется портативный аудиоплеер iPod nano, который был предварительно протестирован на предмет отсутствия искажений опорного сигнала в рабочей полосе частот вибратора. Один канал предназначен для воспроизведения опорного сигнала с частотой дискретизации 48 кГц, а второй — для запуска системы синхронизации отметки момента воздействия, которая генерируется в виде прямоугольного импульса и подается на вход в беспроводной блок синхронизации сейсмостанции.

Масса всей вибрационной установки в сборе на данный момент составляет 37 кг, что является приемлемым для комфортной ручной транспортировки по профилю со сложным рельефом с участием двух человек. На рис. 3 приведены фотографии, демонстрирующие процесс работы с вибрационной установкой в полевых условиях.

3. Полевые эксперименты

Тестирование вибрационного источника поперечных волн производилось на территории геофизического стационара ИНГГ СО РАН. Целью экспериментов было сравнение качества получаемых данных и эффективности работы со стандартным импульсным источником поперечных волн (удары кувалдой по стенкам траншеи), а также отработка оптимальной технологии работы на профиле. Во всех экспериментах регистрация колебаний производилась с использованием бескабельной телеметрической системы SCOUT, представляющей собой блоки автономной регистрации, укомплектованные трехкомпонентными 5-герцовыми геофонами с повышенной чувствительностью GS-ONE LF.

3.1. Сопоставление вибрационного и импульсного ударного источников

Эксперимент по генерации поперечных S-волн и сопоставлению результатов для разработанного вибрационного и импульсного источников производился следующим образом. Виброисточник устанавливался в начале сейсмического профиля на площадку с предварительно снятым слоем дерна и пригружался весом оператора. Общая длина профиля составила 125 м при шаге между приемниками 5 м. Воздействия производились поперек линии профиля, и анализировалась Y-компонента трехкомпонентной записи. В качестве опорного сигнала использовался линейный СВИП с разверткой частоты от 20 до 200 Гц длительностью 20 с. Начальная частота была выбрана таким образом, чтобы в полосу генерируемых частот не попало значение ≈ 18 Гц, соответствующее резонансной частоте излучателя. Сопоставление полученных коррелограмм от виброисточника производилось с разностными сейсмограммами от встречных ударов кувалды по металлической пластине, прижатой к борту ямы.

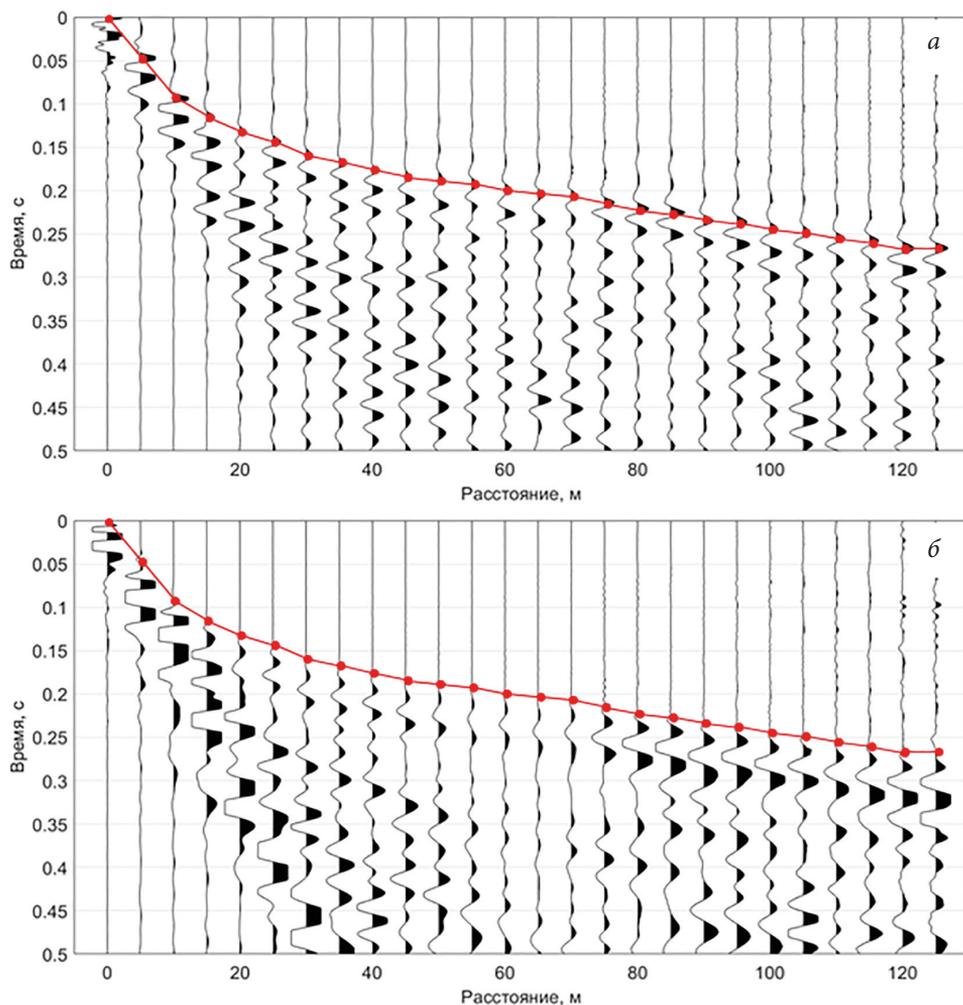


Рис. 4. Сопоставление данных от вибрационного и импульсного источников: а — коррелограмма от виброисточника (линейный СВИП, 20–200 Гц, 20 с.); б — результат вычитания сейсмограмм от встречных воздействий для кувалды (Y-компонента, Y-воздействие). Красной линией обозначен результат определения времен первых вступлений на сейсмограмме (б)

На рис. 4 приведены коррелограмма от виброисточника (рис. 4, а) и результат вычитания сейсмограмм от встречных воздействий для кувалды (рис. 4, б). Красной линией обозначен результат определения времен первых вступлений на сейсмограмме от импульсного источника. Та же линия перенесена на коррелограмму.

Как видно из рисунка, на всех трассах коррелограммы явно выделяется максимум корреляционной функции, соответствующий первым вступлениям на сейсмограмме. Этот факт значительно упрощает процесс определения времен прихода целевых волн, так как максимум корреляционной функции пикируется значительно устойчивее, чем первые вступления на сейсмограмме.

По нашим наблюдениям, значительно упрощается процесс оценки качества получаемых данных в ходе работ на профиле, так как данные от импульсного источника

требуют вычитания сейсмограмм от встречных воздействий, что можно оперативно сделать лишь при высокой степени идентичности отдельных накоплений. Коррелограмма оперативно рассчитывается при помощи процедур, встроенных в программное обеспечение сейсмостанции, либо сторонних программ для предварительной обработки и визуализации данных вибрационной сейсморазведки.

На рис. 5 показано сопоставление осредненных и нормированных амплитудных спектров сигналов от вибрационного и импульсного источников для удалений с 45 до 125 м от ПВ и временного интервала от 0.15 до 0.3 с.

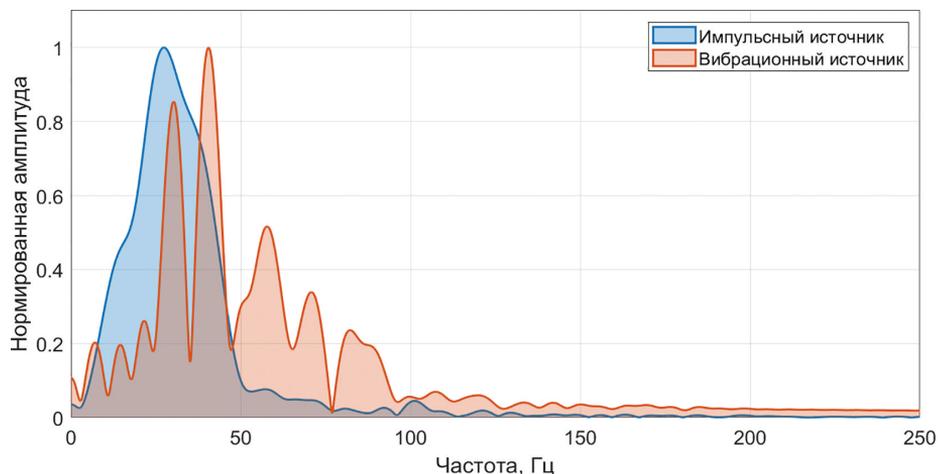


Рис. 5. Сопоставление осредненных амплитудных спектров сигналов от вибрационного и импульсного источников для удалений с 45 до 125 м от ПВ и временного интервала от 0.15 до 0.3 с

На сопоставлении спектров наглядно продемонстрировано, что доминирующая частота сигнала от кувалды составила приблизительно 25 Гц, в то время как от вибрационной установки это значение примерно в 1.7 раза выше (44 Гц). В целом частотный диапазон колебаний от кувалды ограничен сверху значением 50 Гц, у вибрационной установки — 90 Гц. Из этого следует, что виброисточник потенциально имеет более высокую разрешающую способность.

В то же время на спектре хорошо видно, что частоты выше 100 Гц практически полностью затухают. Из чего следует, что на подобном геологическом разрезе нет смысла использовать СВИП-сигналы с верхней границей частотного диапазона выше 100 Гц.

3.2. Отработка технологии проведения полевых работ

Для отработки оптимальной технологии проведения полевых работ был проведен профильный эксперимент (см. систему наблюдений на обобщенной плоскости на рис. 6). Эксперимент намеренно проводился в условиях, близких к производственным, — в рабочие часы и ветреную погоду. Кроме того, в 200 м от профиля активно шли строительные работы. Детальные сейсморазведочные наблюдения велись вдоль линейного профиля длиной 78 м с шагом между соседними приемниками 2 м. Шаг

между соседними пунктами возбуждения — 10 м. По сравнению с вышеописанным экспериментом были скорректированы параметры возбуждения: длительность СВИП-сигнала увеличена до 60 с (до максимального значения, которое можно записать стандартными средствами в SEG-Y-файл), а верхняя граница частотного диапазона уменьшена до 100 Гц.

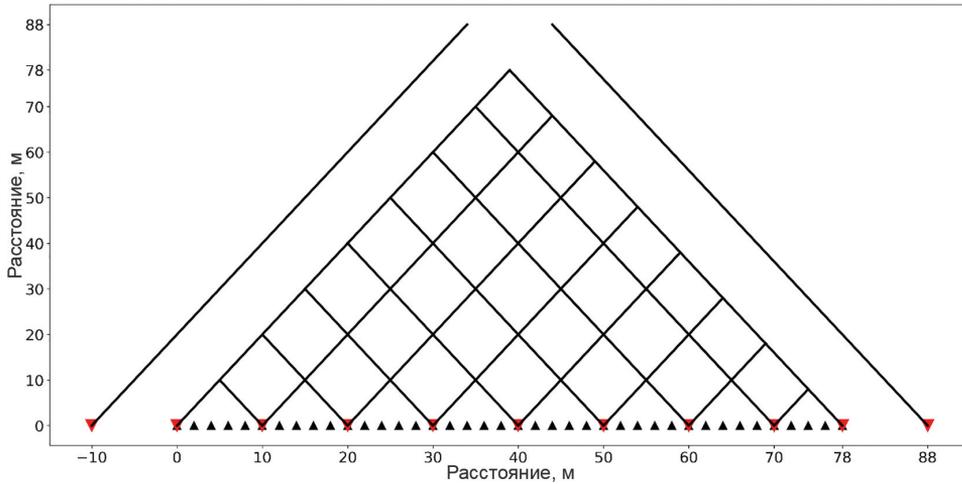


Рис. 6. Схема сейсмозвездочных наблюдений на обобщенной плоскости

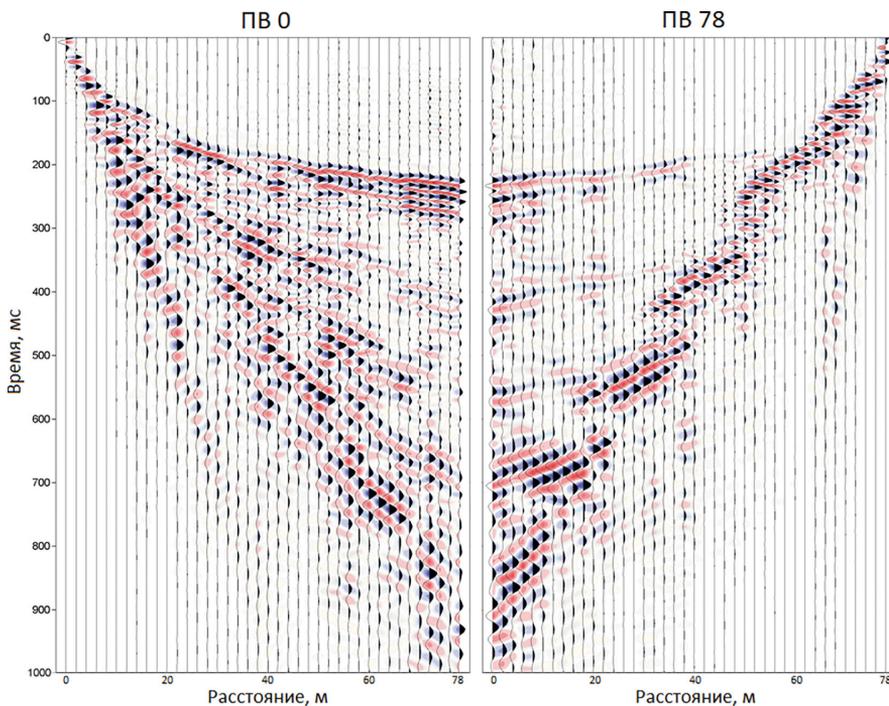


Рис. 7. Примеры коррелограмм с крайних ПВ линейного профиля, визуализированные в программе SeiSee (Y-компонента, Y-воздействие)

С учетом подготовки площадки для установки блока с излучателями и переносом вибрационной установки на обработку каждого ПВ уходило от 3 до 5 мин. Наблюдения на профиле заняли около часа (без учета установки сейсмоприемников), что является хорошим показателем для получения данных по поперечным волнам высокого качества (соотношение сигнал/шум на всех трассах более 5). На рис. 7 приведены примеры коррелограмм, полученных в ходе эксперимента.

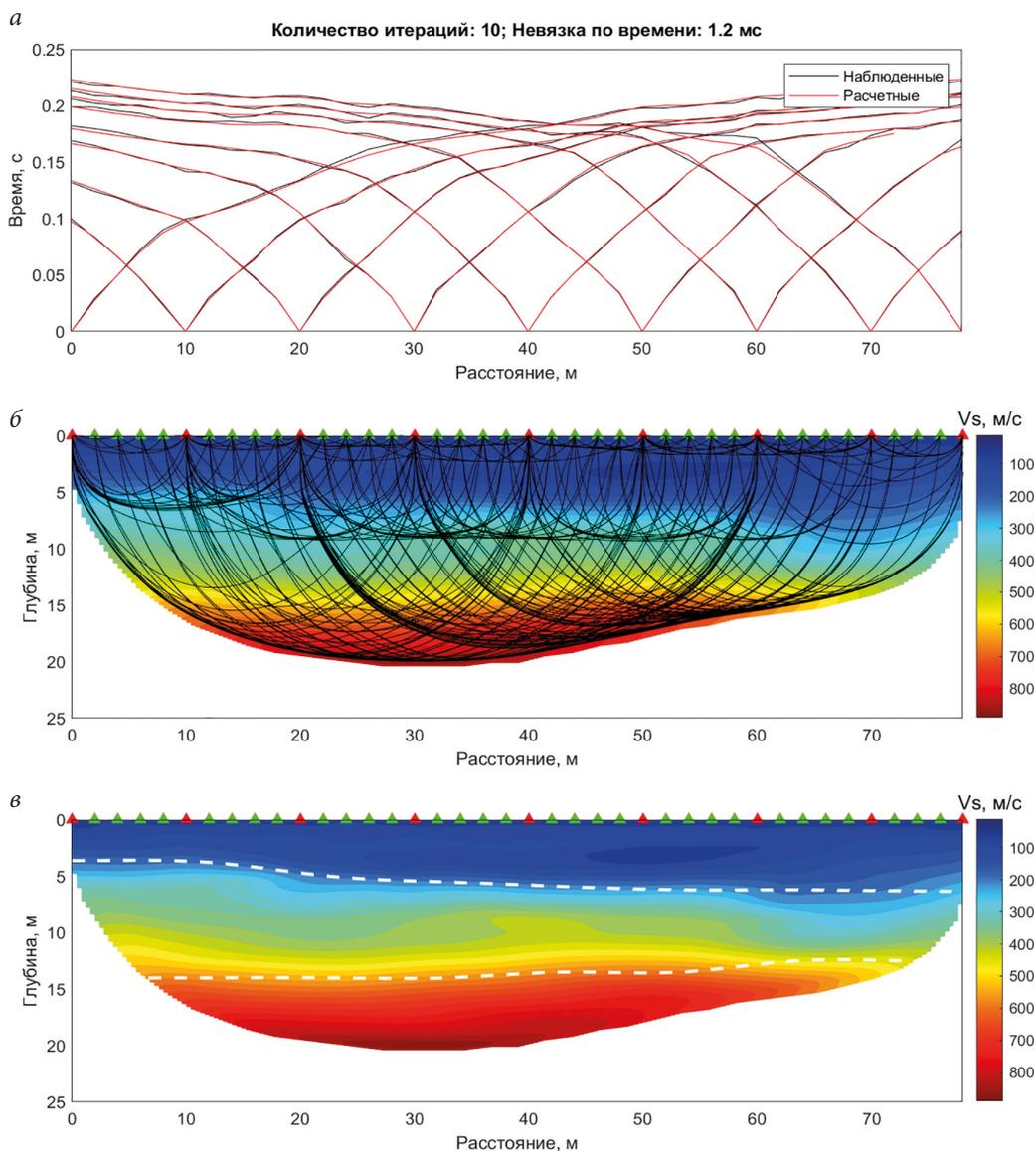


Рис. 8. Результат обработки данных МПВ методом сейсмической томографии:

а — сопоставление наблюдаемых и расчетных годовграфов; *б* — лучевая схема; *в* — гладкая сейсотомографическая модель. Зеленые треугольники — приемники (ПП), красные — источники (ПВ). Белые пунктирные линии — границы, подобранные с использованием метода прямого лучевого трассирования

Обработка данных состояла из следующих этапов:

- 1) корреляции исходных виброграмм (производилась в процессе работы);
- 2) определения времен первых вступлений целевых волн по максимумам корреляционных импульсов;
- 3) проверки увязки годографов по взаимным временам (увязка не потребовалась из-за высокого соотношения сигнал/шум и отсутствия проблем с синхронизацией);
- 4) построения сейсмотомографического разреза по поперечным волнам;
- 5) подбора слоистой скоростной модели с использованием метода прямого лучевого трассирования.

Первичное построение скоростного разреза по поперечным волнам производилось с использованием алгоритма сейсмической томографии (Никитин и др., 2020), в котором для решения прямой задачи применяется эйконал-солвер BLSM (Nikitin et al., 2018).

Результат обработки данных МПВ методом сейсмической томографии приведен на рис. 8. Дополнительно на гладкую сейсмотомографическую модель нанесены границы, подобранные с использованием метода прямого лучевого трассирования.

По результатам подбора модели методом прямого лучевого трассирования удалось выделить три слоя: два верхних с мощностями около 5 и 8.5 м и скоростями S-волн около 110 и 345 м/с соответственно. Также выделяется нижний слой с кровлей на глубине около 13.5 м и скоростью около 1000 м/с. По литологической колонке скважины, расположенной в 100 м от сейсмического профиля, два верхних низкоскоростных слоя состоят из глинистых песков с переслаиванием суглинков и супесей, а нижний — из сильно выветрелых зеленовато-серых рассланцованных алевролитов.

4. Обсуждение результатов

Тестирование прототипа портативного вибрационного источника на основе низкочастотных акустических преобразователей показало его высокую эффективность при возбуждении поперечных S-волн в сравнении с ударным источником (кувалдой), наиболее широко применяемым в инженерной сейсморазведке. Основные преимущества разработанной установки: отсутствие необходимости вычитания встречных воздействий; минимальные затраты времени при подготовке площадки ПВ; более высокий частотный диапазон регистрируемых колебаний; простота обработки коррелограмм; идентичность вибрационных воздействий на разных ПВ. Последнее представляется крайне актуальным при создании автоматизированных систем вибрационного сейсмического мониторинга.

Анализ экспериментальных данных показал, что даже при среднем уровне шумов (постоянный ветер и стройка в 200 м от профиля) удастся уверенно проследивать преломленные волны на удалениях до 100 м и более, обеспечивая значение соотношения сигнал/шум 5 и выше. Чтобы достичь такого значения, достаточно излучать линейный СВИП-сигнал длительностью 60 с и обеспечить развертку частоты от 20 до 100 Гц. Эти показатели можно улучшить, увеличив количество излучателей либо используя более длительный опорный сигнал.

По нашим оценкам, в текущей компоновке с использованием каскада батарей емкостью 7.2 А·ч вибрационная установка способна проработать в непрерывном режиме не менее часа. Таким образом, без подзарядки аккумуляторов можно

отработать не менее 60 ПВ при длительности СВИП-сигнала, равной одной минуте. Соответственно, при использовании 20-секундных СВИП-сигналов, этот показатель утраивается. Данный показатель можно улучшить, заменив свинцово-кислотные аккумуляторы на литий-железо-фосфатные (LiFePO₄). Это поможет значительно уменьшить вес и габариты силового блока, однако их стоимость в несколько раз превышает стоимость каскада 12.5-вольтовых батарей. По нашим оценкам, такая компоновка с аккумуляторами емкостью 10 А·ч будет весить менее 10 кг. Дополнительным плюсом использования LiFePO₄ аккумуляторов является температурный диапазон их штатной работы, который начинается с –20 °С, что позволит работать с виброисточником в зимнее время без потери емкости.

По мнению авторов, еще одной перспективной доработкой может стать оснащение вибрационной установки одним или несколькими излучателями в вертикальной ориентации и селектором для переключения режимов (Pugin et al., 2013). При использовании трех- или двухкомпонентных приемников станет возможно работать в комбинированном режиме: получать разрезы по продольным и поперечным волнам. В перспективе это также поможет комплексировать наблюдения методами МОВ ОГТ и MASW на разрезах без роста скорости с глубиной, где стандартный метод преломленных волн не работает. В случае работ методом MASW с использованием высокочастотных геофонов есть возможность использовать метод частотной характеристики (Dergach et al., 2019), чтобы расширить их частотный диапазон до значений 1–5 Гц, необходимых для увеличения глубинности метода.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на генерацию отраженных SH-волн на разрезах без роста (и даже с уменьшением) скорости с глубиной, а также улучшение качества данных посредством использования адаптивных нелинейных СВИП-сигналов. Это позволит проводить исследования верхней части разреза в северных регионах с мерзлыми грунтами, где использование вибрационного источника поперечных волн позволяет значительно подавить поверхностные волны и, таким образом, облегчить регистрацию отраженных волн. Заметим, что тот же метод может быть использован при проведении работ в присутствии дорожного покрытия (инверсный разрез).

Литература

- Кострыгин, Ю. П. (1990). *Сейсморазведка на сложных зондирующих сигналах*. М.: Недра.
- Никитин, А. А., Дучков, А. А., Кулаков, И. Ю., Чернышов, Г. С. (2020). ST3D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.
- Чичинин, И. С. (1965). Вопросы теории сейсмического виброндирования. В: И. С. Чичинин, ред., *Методика сейсморазведки*. М.: Наука, 147–163.
- Шнеерсон, М. Б. и Майоров, В. В. (1980). *Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний*. М.: Недра.
- Brodic, B., De Kunder, R., Ras, P., Van den Berg, J., Malehmir, A. (2019). Seismic imaging using electromagnetic vibrators-Storm versus Lightning. In: *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Vol. 2019, no. 1, September, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902406>
- Crawford, J. M., Doty, W. E., Lee, M. R. (1960). Continuous signal seismograph. *Geophysics*, 25 (1), 95–105. <https://doi.org/10.1190/1.1438707>
- Dean, T., Nguyen, H., Kopic, A., Halliday, D. (2019). The construction of a simple portable electromagnetic vibrator from commercially available components. *Geophysical Prospecting*, 67 (6-Geophysical Instrumentation and Acquisition), 1686–1697. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12645>

- Dergach, P. A., Tubanov, T. A., Yushin, V. I., Duchkov, A. A. (2019). Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms. *Seismic Instruments*, 55, 345–352. <https://doi.org/10.3103/S0747923919030046>
- Melnikov, V. P., Skvortsov, A. G., Malkova, G. V., Drozdov, D. S., Ponomareva, O. E., Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., Dubrovin, V. A. (2010). Seismic studies of frozen ground in Arctic areas. *Russian Geology and Geophysics*, 51 (1), 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.011>
- Nikitin, A. A., Serdyukov, A. S., Duchkov, A. A. (2018). Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs. *Computational Geosciences*, 22, 775–787. <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9725-9>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Pugin, A. M., Brewer, K., Cartwright, T., Pullan, S. E., Perret, D., Crow, H., Hunter, J. A. (2013). Near surface S-wave seismic reflection profiling—new approaches and insights. *First Break*, 31 (2). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013005>
- Rozmond, H. J. (1996). Slip-sweep acquisition. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996*. Society of Exploration Geophysicists, 64–67 <https://doi.org/10.1190/1.1826730>
- Yablokov, A. V., Dergach, P. A., Serdyukov, A. S., Polozov, S. S. (2022). Development and Application of a Portable Vibroseis Source for Acquisition and Analysis of Seismic Surface Wave Data. *Seismic Instruments*, 58 (Suppl 2), S195–S203. <https://doi.org/10.3103/S074792392208014X>
- Yablokov, A. V., Serdyukov, A. S., Loginov, G. N., Baranov, V. D. (2021). An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves. *Geophysical Prospecting*, 69 (7), 1405–1432. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13107>

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2023 г.
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Дергач Петр Александрович — dergachpa@ipgg.sbras.ru
Яблоков Александр Викторович — yablokovav@ipgg.sbras.ru
Полозов Станислав Сергеевич — polozovss@ipgg.sbras.ru
Зобнин Глеб Юрьевич — g.zobnin@gsu.ru
Дучков Антон Альбертович — duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Field testing of a portable vibration seismic source of S-waves for detailed near-surface studies*

P. A. Dergach¹, A. V. Yablokov^{1,2}, S. S. Polozov¹, G. Yu. Zobnin^{1,2}, A. A. Duchkov¹

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3, pr. Akademika Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University,
2, ul. Pirogova, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

For citation: Dergach, P. A., Yablokov, A. V., Polozov, S. S., Zobnin, G. Yu., Duchkov, A. A. (2024). Field testing of a portable vibration seismic source of S-waves for detailed near-surface studies. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 237–250. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.202> (In Russian)

*The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00237, director A. A. Duchkov).

We report the results of testing a portable vibration seismic source designed for generating S-waves in the frequency range from 5 to 200 Hz (designed at the Institute of Petroleum Geology and Geochemistry SB RAS based on serial low-frequency acoustic transducers). We first describe the source design and then present the results of field experiments and their comparison to the impulse source of S-waves (sledgehammer against the opposite walls of a trench). Analysis of experimental data showed that even with an average noise level (constant wind of 5–10 m/s and construction work at a distance of about 200 meters from the profile) it is possible to reliably trace refracted waves at distances of up to 100 meters or more with a signal-to-noise ratio of 5 or higher. We used 60-second linear sweep signal with a frequency changing from 20 to 100 Hz. The source of shear waves can be used in near-surface seismic studies using the methods of refracted waves, multichannel analysis of surface Love waves (MALW), as well as reflected SH waves (RPM). The last two methods are important for studying geological sections with velocity inversions with depth which is extremely important when working in permafrost regions since the refracted wave method (REM) is not effective in this case. The use of the vibration S-wave source may significantly suppress surface waves.

Keywords: Near-surface seismic, vibration source, shear waves, refracted wave method, low-frequency acoustic transducer, sweep signal.

References

- Brodic, B., De Kunder, R., Ras, P., Van den Berg, J., Malehmir, A. (2019). Seismic imaging using electromagnetic vibrators-Storm versus Lightning. In: *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Vol. 2019, no. 1, September. European Association of Geoscientists & Engineers, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902406>
- Chichinin, I. S. (1965). Questions of the theory of seismic vibration sounding. In: I. S. Chichinin, pod. red. *Metodika seismorazvedki*. Moscow: Nauka Publ., 147–163. (In Russian)
- Crawford, J. M., Doty, W. E., Lee, M. R. (1960). Continuous signal seismograph. *Geophysics*, 25 (1), 95–105. <https://doi.org/10.1190/1.1438707>
- Dean, T., Nguyen, H., Kopic, A., Halliday, D. (2019). The construction of a simple portable electromagnetic vibrator from commercially available components. *Geophysical Prospecting*, 67 (6-Geophysical Instrumentation and Acquisition), 1686–1697. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12645>
- Dergach, P. A., Tubanov, T. A., Yushin, V. I., Duchkov, A. A. (2019). Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms. *Seismic Instruments*, 55, 345–352. <https://doi.org/10.3103/S0747923919030046>
- Kostrыgin, Iu. P. (1990). *Seismic exploration using complex sounding signals*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Melnikov, V. P., Skvortsov, A. G., Malkova, G. V., Drozdov, D. S., Ponomareva, O. E., Sadurtdinov, M. R., Tsarev, A. M., Dubrovin, V. A. (2010). Seismic studies of frozen ground in Arctic areas. *Russian Geology and Geophysics*, 51 (1), 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.011>
- Nikitin, A. A., Duchkov, A. A., Kulakov, I. Iu., Chernyshov, G. S. (2020). ST3D: *Certificate of state registration of a computer program*. (In Russian)
- Nikitin, A. A., Serdyukov, A. S., Duchkov, A. A. (2018). Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs. *Computational Geosciences*, 22, 775–787. <https://doi.org/10.1007/s10596-018-9725-9>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64 (3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Pugin, A. M., Brewer, K., Cartwright, T., Pullan, S. E., Perret, D., Crow, H., Hunter, J. A. (2013). Near surface S-wave seismic reflection profiling — new approaches and insights. *First Break*, 31 (2). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013005>
- Rozemond, H. J. (1996). Slip-sweep acquisition. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996*. Society of Exploration Geophysicists, 64–67. <https://doi.org/10.1190/1.1826730>
- Shneerson, M. B. and Maiorov, V. V. (1980). *Land seismic exploration with non-explosive vibration sources*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)

- Yablokov, A. V., Dergach, P. A., Serdyukov, A. S., Polozov, S. S. (2022). Development and Application of a Portable Vibroseis Source for Acquisition and Analysis of Seismic Surface Wave Data. *Seismic Instruments*, 58 (Suppl 2), S195–S203. <https://doi.org/10.3103/S074792392208014X>
- Yablokov, A. V., Serdyukov, A. S., Loginov, G. N., Baranov, V. D. (2021). An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves. *Geophysical Prospecting*, 69 (7), 1405–1432. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13107>

Received: November 2, 2023

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Petr A. Dergach — dergachpa@ipgg.sbras.ru

Alexandr V. Yablokov — yablokovav@ipgg.sbras.ru

Stanislav S. Polozov — polozovss@ipgg.sbras.ru

Gleb Yu. Zobnin — g.zobnin@g.nsu.ru

Anton A. Duchkov — duchkovaa@ipgg.sbras.ru