

А. А. Белоусов^{1,2}✉, П. А. Дергач^{1,2}, А. В. Яблоков^{1,2}, Г. Ю. Зобнин^{1,2}

Результаты методических испытаний системы оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация,

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: belousov111222@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено развитию методов инженерной сейсморазведки, а именно сокращению времени полевых измерений без ущерба для качества получаемых данных. Для этого был сконструирован прототип системы оперативной диагностики пород ВЧР, состоящий из подвижной сейсмической расстановки и портативного вибрационного источника поперечных волн. Использование подобных компоновок позволяет оперативно производить сейсмические наблюдения вдоль протяженных линейных профилей используя системы наблюдений характерные для сейсморазведки МОВ ОГТ. Испытания проводились в зимнее время и были максимально приближены к производственным. По результатам анализа волновой картины на полученных сейсмограммах были сделаны выводы о полном подавлении поверхностных волн и выделении отраженных от границы между рыхлыми и плотными грунтами. Построен предварительный временной разрез МОВ ОГТ. Использование системы на порядок сокращает время измерений по сравнению с классической инженерной сейсморазведкой, а минимальное количество сотрудников, необходимое для работы с системой – 2 человека: водитель и оператор сейсмостанции.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, вибрационный источник, метод отраженных волн, поперечные волны, подвижная сейсмическая расстановка

A. A. Belousov^{1,2}✉, P. A. Dergach^{1,2}, A. V. Yablokov^{1,2}, G. Y. Zobnin^{1,2}

Results of methodical tests of the system of diagnostics of near-surface seismic section using reflected SH-waves

¹ A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG) SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation,

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: belousov111222@gmail.com

Annotation. The research is devoted to the development of engineering seismic exploration methods, namely, reducing the time of field measurements without compromising the quality of the data obtained. For this purpose, a prototype of an operational rock diagnostic system was constructed, consisting of a movable seismic arrangement and a portable vibrational transverse wave source. The use of such arrangements makes it possible to quickly make seismic observations along extended linear profiles using observation systems typical for CDP seismic exploration. The tests were carried out on concrete and dirt roads and were as close as possible to production ones. Based on the results of the analysis of the wave pattern on the obtained seismograms, conclusions were drawn about the complete suppression of surface waves and the confident separation of reflected waves from the boundary between loose and dense soils. A preliminary time section has been constructed. Using the system significantly reduces the measurement time compared to classical engineering seismic exploration, and the minimum number of employees required to work with the system is 2 people: the driver and the operator of the seismic station.

Keywords: near-surface seismic, vibration source, reflection seismic, reflected wave method, shear waves, land streamer

Введение

Данная работа посвящена развитию методов проведения полевых измерений в области инженерной сейсморазведки. Основной задачей являлось сокращение времени полевых измерений без ущерба для качества получаемых данных. Для её решения авторами был сконструирован прототип системы оперативной диагностики пород верхней части разреза (ВЧР), состоящий из подвижной сейсмической расстановки (аналогичные разработки упоминаются в зарубежной литературе как «Land Streamer» [1], [2]) и портативного вибрационного источника поперечных волн [3]. Использование подобных компоновок позволяет оперативно производить сейсмические наблюдения вдоль протяженных линейных профилей, в частности используя системы наблюдений характерные для сейсморазведки методом отраженных волн МОВ ОГТ [4]. Несмотря на свою распространенность в нефтегазовой отрасли, применение МОВ ОГТ для решения задач инженерной сейсморазведки осложнено в силу особенностей волнового поля, связанных с наличием поверхностных волн Лява и Рэлея, которые, в свою очередь, являются помехами при выделении отраженных волн. Однако ситуация меняется в случае инверсного разреза, когда при возбуждении и регистрации SH-волн поверхностные волны не образуются [5]. Инверсный разрез характерен для северных регионов, где широко распространено сезонное промерзание приповерхностного слоя грунтов. Стандартный для инженерной сейсморазведки метод преломленных волн (МПВ) в таких условиях малоэффективен и для детального изучения ВЧР применяются методы МОВ ОГТ на SH-волнах и MASW.

В данной работе приведены результаты серии испытаний прототипа системы оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн. Испытания проводились в зимнее время на территории Новосибирской области.

Аппаратура

На момент испытаний прототип системы оперативной диагностики состоял из двух основных элементов: 24 канальной двухкомпонентной буксируемой расстановки приемников и портативного вибрационного источника с блоком управления. Буксируемая коса была собрана на основе трехкомпонентных 5-герцовых геофонов GS-ONE LF (12 шт.), подключенных к станции SGD-SEL, причем подключались только вертикальная и одна горизонтальная (поперек линии профиля) компоненты датчиков. Сами датчики были жестко закреплены на стальных подложках с грунтозацепами, обеспечивающими прорезание грунта по мере движения расстановки, для обеспечения её более стабильного положения. Буксируемая расстановка не предполагает дополнительного воздействия на приемники (прижима) для более жёсткой установки со стороны человека. По сравнению с установленными вручную приемниками это может являться недостатком, так как обеспечение плотного контакта датчик-грунт является необходимым условием для хорошего качества полевых данных. Однако, как будет показано далее, конструкция платформ и масса датчика обеспечивают хороший контакт датчика с грунтом и, как следствие, качество полевых данных.

Для генерации сейсмических колебаний использовалась авторская разработка: портативный вибрационный источник поперечных волн, а точнее его усовершенствованная версия [6] состоящая из:

1. Блока излучателей, состоящего из шести низкочастотных акустических преобразователей энергии, жестко закрепленных внутри на противоположных стенках металлического корпуса (по 3 штуки с каждой стороны).
2. Блока питания и управления, в состав которого входят 2 аккумулятора (LiFePO₄, 48 вольт, 12 Ач, 30 А), а также 6 усилителей.
3. Аудиоустройства для воспроизведения опорного сигнала и синхроимпульса.
4. Силового кабеля питания РПШ 12х2.5 с разъёмами P32K3Q 12pin.

В такой компоновке сигнал от виброисточник уверенно прослеживается на удалении вплоть до 355 метров (SNR>5), чего с запасом хватает для решения задач данного исследования. Чтобы достичь таких показателей, достаточно излучать линейный СВИП-сигнал длительностью 30-60 секунд с разверткой частоты от 5 до 80 Гц.

Методика полевых измерений

В силу ограниченного числа датчиков, для обеспечения значения кратности перекрытия, приемлемого для суммирования отраженных волн, осуществлялось два проезда в противоположных направлениях с возбуждением колебаний на одних и тех же координатах ПВ. Монтаж итоговых виброграмм производился на этапе предварительной обработки данных. При этом шаг между пунктами возбуждения составлял 2 метра. Воздействия производились поперек линии профиля, анализировалась Y-компонента двухкомпонентной записи. В качестве опорного сигнала использовался линейный свип с разверткой частоты от 5 до 80 Гц длительностью 30 секунд. Параметры записи сейсмостанции: частота дискретизации – 1000 Гц; длительность – 32 с; коэффициент усиления – 24 дБ, тип синхронизации – проводная (синхроимпульс в виде ступеньки напряжения).

На (рис. 1) приведены фотографии, демонстрирующие процесс работы с системой оперативной диагностики ВЧР в полевых условиях зимой.

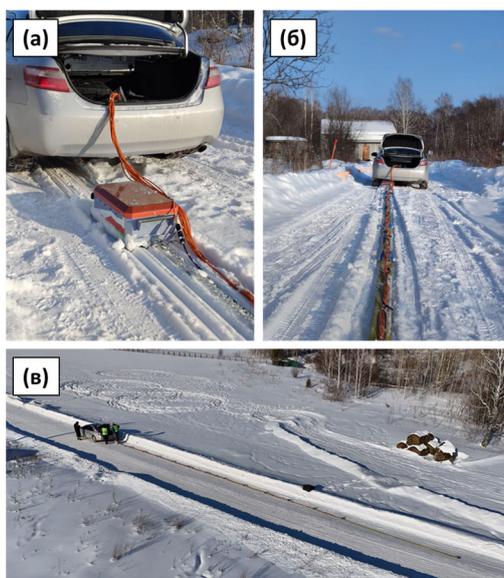


Рис. 1. Фотографии, демонстрирующие процесс работы с системой оперативной диагностики ВЧР в полевых условиях зимой.

На (рис. 1а, б) видно, что при перемещении по зимнику массивный виброисточник уплотняет снег и создает колею, по которой за ним двигаются датчики. Полозья виброисточника и грунтозацепы платформ спроектированы таким образом, чтобы обеспечивать хороший контакт датчика с грунтом.

Зимние испытания системы производились на двух объектах: дорога с бетонным покрытием (рис. 1а, б) и дорога с грунтовым покрытием (рис. 1в). Причем во втором случае измерения производились днем, а вблизи находилась трасса и остановка общественного транспорта. Длина профилей составила 70 и 142 м соответственно.

Результаты и обсуждение

На (рис. 2) приведен пример монтажа встречных полевых сейсмограмм для двух соседних ПВ. На сейсмограммы наложены расчетные годографы отраженных волн (синие гиперболы) и приведены соответствующие значения t_0 , эффективных скоростей (v) и угла наклона границы (ϕ_i).

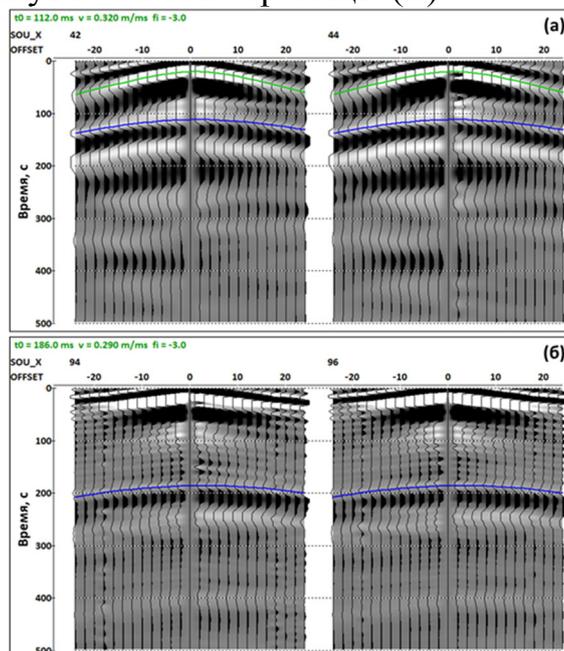


Рис. 2. Пример полевых сейсмограмм ОПВ с соседних ПВ для профилей на бетонной (а) и грунтовой (б) дорогах.

Необходимо отметить, что центральная трасса на сейсмограмме соответствует контрольному датчику, установленному на корпусе виброисточника. На момент проведения испытаний датчик ещё не был смонтирован и поэтому на сейсотрассе записаны нулевые значения.

По результатам визуального анализа можно произвести интерпретацию наблюдаемого волнового поля и сделать следующие выводы:

1. Наличие инверсного слоя сезонной мерзлоты позволило полностью избавиться от поверхностных волн при наблюдениях на SH-волнах

2. На сейсмограмме четко видна интенсивная отраженная волна. По своим кинематическим характеристикам она соответствует отражению от границы рыхлых и плотных грунтов на глубинах около 20 и 25-30 метров для профилей на бетонной и грунтовой дорогах, соответственно.

3. На сейсмограмме видна прямая волна, распространяющаяся в слое сезонной мерзлоты с кажущейся скоростью порядка 900 м/с.

4. Несмотря на то, что качество установки датчиков на протяжении проведения испытаний намеренно не контролировалось, количество шумящих каналов на приведенных сейсмограммах минимально.

Испытания на грунтовой дороге были максимально приближены к производственным: по ней периодически перемещались люди и автотранспорт, а буквально в 30 метрах от конца профиля была расположена конечная остановка общественного транспорта. Несмотря на это, по нашим оценкам, из 1152 сейсморасс всего 53 были признаны непригодными для обработки, что составляет менее 5% от их общего количества. Временной разрез, полученный в результате экспресс-обработки данных с профиля на грунтовой дороге методом МОВ ОГТ приведен на рис. 3.

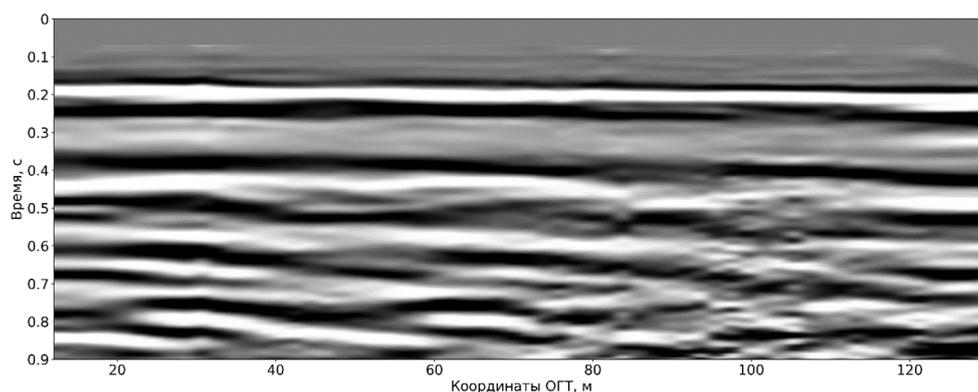


Рис. 3. Результат экспресс-обработки данных с профиля на грунтовой дороге методом МОВ ОГТ.

Экспресс-обработка данных по методу МОВ ОГТ выполнялась с целью построения предварительного скоростного разреза и включала последовательное выполнение следующих этапов:

1. Расчет и бинирование точек ОГТ (шаг между ОГТ - 2 м);
2. Применение F-K-фильтра (скоростное окно от 0 до 300 м/с);
3. Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд (SCAC);
4. Компенсация геометрического расхождения;
5. Скоростной анализ и ввод скоростного закона;
6. Суммирование трасс ОГТ.

На полученном временном разрезе явно выделяется отражающая граница с t_0 порядка 200 мс, глубину которой мы оценили в 25-30 метров. Чтобы выделить

более глубокие границы необходима расширенная обработка МОВ ОГТ с использованием процедуры подавления кратных волн.

Заключение

Разработана и успешно протестирована система оперативной диагностики ВЧР с использованием отраженных SH-волн на основе новой версии портативного вибрационного источника и наземной буксируемой косы. Продемонстрирована высокая производительность работ без ущерба для качества получаемых данных. Использование системы в разы сокращает время измерений по сравнению с классической инженерной сейсморазведкой. Минимальное количество сотрудников, необходимое для работы с системой – 2 человека: водитель и оператор сейсмостанции.

По результатам анализа волновой картины на полученных сейсмограммах были сделаны выводы о полном подавлении поверхностных волн и уверенном выделении отраженных от границы между рыхлыми и плотными грунтами, расположенной на глубинах около 20 и 25-30 метров для профилей на бетонной и грунтовой дорогах, соответственно. Построен предварительный временной разрез методом МОВ ОГТ.

Итоговое время, за которое были произведены измерения на профиле вдоль грунтовой дороги составило около 2 часов, что значительно меньше, чем при классических способах измерений в инженерной сейсморазведке. За это время были произведены монтаж/демонтаж системы, измерения на 96 ПВ, а также перемещения между ними.

Безусловно у такой технологии проведения полевых измерений есть и свои минусы. Основной – это необходимость расчистки и подготовки профиля при помощи снегоуборочной техники, либо использование системы на расчищенных от рыхлого снега дорогах (зимниках). Однако с учетом высокой производительности работ и малого числа сотрудников, задействованных в процессе измерений, возможно такая технология в некоторых случаях окажется экономически выгоднее. Особенно в случае больших объемов выполняемых работ.

Уже после проведения зимних испытаний система была модернизирована. В частности, ориентация двух из 6 излучателей виброисточника была изменена на вертикальную, а блок управления дополнен селектором выбора режимов работы. Благодаря этому появилась возможность осуществлять комбинированные измерения с использованием продольных либо поперечных волн. Таким образом, появляется возможность выбора методов в зависимости от типа сейсмического разреза: на нормальном разрезе можно производить измерения методами МПВ на продольных и поперечных волнах; на инверсном – методом МОВ ОГТ с использованием SH-волн. Кроме того, на всех типах разрезов можно проводить исследования методом MASW, как на волнах Рэлея, а в случае нормальных разрезов – и на волнах Лява.

Дальнейшим развитием данной тематики станет модернизация системы управления вибрационным источником с использованием беспроводной системой передачи данных и контроля параметров вибрационной установки, что зна-

чительно упростит работу с устройством и положительно скажется на производительности. Также планируется доработка буксируемой косы: увеличение количества приемников до 24 штук (2С), а также использование различных сейсмических кос, что позволит в зависимости от задачи выбирать расстояние между датчиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eiken, O., Degutsch, M., Riste, P., & Rød, K. (1989). Snowstreamer: an efficient tool in seismic acquisition. *First Break*, 7(9), 01 Sep 1989. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1989021>
2. Inazaki, T. (1999). Land Streamer: A New System For High-resolution S-Wave Shallow Reflection Surveys. In *Proceedings of the 12th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (cp-202-00023)*. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.202.1999_023
3. 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.
4. 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>
5. Скворцов, А. Г., Царев, А. М., Садуртдинов, М. Р., & Гаврилов, А. В. (2011, October). Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах—опыт применения. In *Galperin Readings 2011 (pp. cp-276)*. European Association of Geoscientists & Engineers.
6. Дергач П.А., Яблоков А.В., Зобнин Г.Ю., Белоусов А.А., Полозов С.С. Разработка портативного вибрационного источника поперечных волн для задач инженерной и рудной сейсморазведки // *Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами: Материалы научно-практической конференции (г. Красноярск, 22-25 октября 2024 г.) – Сибирский федеральный университет – Красноярск – С. 37-42 – 2025.*

© А. А. Белоусов, П. А. Дергач, А. В. Яблоков, Г. Ю. Зобнин, 2025