

В.В. Антипов, В.Г. Офрихтер

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Россия

Совершенствование методов волнового анализа грунтовой толщи

В настоящее время активно развиваются современные неразрушающие методы исследования зоны малых скоростей верхней части разреза. Ввиду отсутствия необходимости выполнять работы по бурению скважин грунтового массива существенно сокращаются трудозатраты и стоимость работ. При этом точность и корректность конечных результатов, полученных неразрушающими методами, почти такие же, как и при использовании разрушающих методов.

Целью данной статьи является обзор многоканальный анализа поверхностных волн (MASW) и дополнительного инструмента для обнаружения аномалий в грунте под названием Back-Scattering Analysis (BSA). Процедура проведения метода подробно рассмотрена на всех этапах проведения работ. Подробно рассмотрены пассивные типы MASW: пассивный в общем случае, пассивный вдоль дороги. Примеры итоговых профилей скоростей поперечных волн ВЧР также представлены в данной статье. Разобран принцип анализа обратно рассеянных волн для обнаружения аномалий в грунте (пустоты, шахты, тоннели и т.д.).

Ключевые слова: зона малых скоростей, волновой анализ, многоканальный анализ, MASW, BSA.

V.V. Antipov, V.G. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Advances of the methods of wave analysis of soil stratification

Modern nondestructive methods of investigation of the low-velocity zone are actively advanced today. In the absence of necessity to perform borings labor expenditures and cost of the operations are reduced significantly. Accuracy and correctness of the final results which are obtained by non-destructive methods is almost the same as when using destructive methods.

The purpose of this article is to review multi-channel analysis of surface waves (MASW) and additional tool called Back-Scattering Analysis (BSA) for detecting anomalies in low-velocity zone. The procedure of MASW method is considered in detail at every stage of the work. The passive types of MASW are considered in details: common passive, passive roadside. Examples of the resulting images are also presented in this article. The principles of Back-Scattering Analysis are described in details.

Key words: low-velocity zone, wave analysis, multichannel analysis, MASW, BSA.

Многоканальный анализ поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW) – это один из современных методов волнового анализа зоны малых скоростей (ЗМС) верхней части разреза (ВЧР) [1]. Метод волнового анализа заключается в регистрации и обработке поверхностных волн Рэлея от разнообразных источников и последующим получении вертикального профиля скоростей поперечных волн грунтового массива. При использовании дополнительного инструмента «Анализ обратного рассеяния» (Back-Scattering Analysis) появляется возможность обнаружения таких аномалий в грунтах, как пустоты, шахты, тоннели и т.п.

Анализ грунтовой толща методом MASW основан на регистрации поверхностных волн Рэлея, дисперсия которых (зависимость фазовой скорости от частоты) анализируется на одном из этапов обработки результатов съемки поверхностных волн [2].

Глубина распространения колебаний волны Рэлея прямо пропорциональна длине волны (обратно пропорциональна частоте) (рис. 1). Высокочастотная волна быстро

затухает и распространяется на малую глубину. Уменьшение частоты позволяет увеличить глубину распространения вплоть до 100 м [3]. Это свойство используется для определения глубины распространения волн в зависимости от используемой частоты, подробнее это будет описано в методике полевого сбора данных.

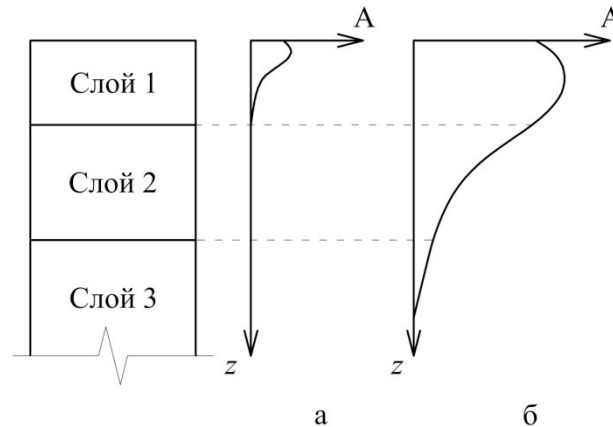


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебания частиц A от глубины распространения поверхностной волны z для высокочастотной волны (а) и низкочастотной волны (б) [4]

Зная скорость поверхностной волны Рэлея и коэффициент Пуассона среды, можно определить скорости объемных волн сжатия и сдвига [2], которые связаны с модулем упругости и модулем сдвига известными зависимостями [5]:

$$G = \rho c_s^2 \quad (1)$$

$$E = \rho c_s^2 \frac{3 \left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 4}{\left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 - 1} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

где c_s – скорость распространения поперечной S-волны; c_p – скорость распространения продольной Р-волны; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность.

Данные зависимости при наличии данных о поперечных скоростях позволяют получить начальный модуль сдвига и начальный модуль упругости и оценить пригодность основания для будущего здания или сооружения. При этом предполагается, что исследуемый грунт имеет послойную модель (рис. 2).

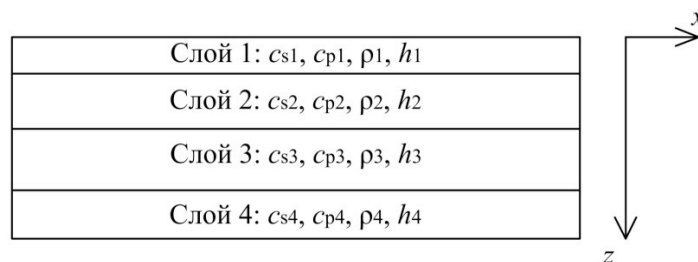


Рис. 2. Послойная модель грунтового массива

Порядок проведения MASW включает в себя три этапа:

1. Сбор полевых данных;

2. Дисперсионный анализ;
3. Инверсия.

В качестве измерительной системы чаще всего используется 24-канальная система из низкочастотных геофонов (4,5 Гц), соединенных с телеметрическим модулем. Если требуется увеличить разрешение итоговых картин можно увеличить количество приемников до 48 шт. Полученные сейсмограммы передаются на портативный компьютер. Схема системы представлена на рис. 3.

Сбор данных в полевых условиях осуществляется активным или пассивным методом (либо их комбинированием) в зависимости от степени контроля исходных параметров:

- время возбуждения колебаний источником;
- расстояние между источником и приемной линией (первым геофоном);
- мощность возбуждения колебаний (частоты).

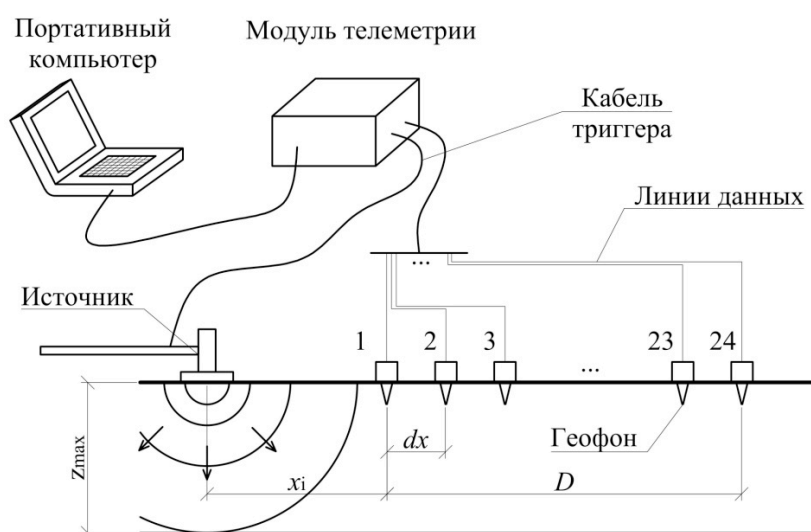


Рис. 3. Схема 24-канальной телеметрической системы при активном методе

При активном методе присутствует возможность контроля всех трех исходных параметров, потому что присутствует полный контроль над источником. В качестве активного источника обычно используется кувалда 8-10 кг (рис. 3), возможно применение иных механизмов. При ударе кувалдой о металлическую пластину происходит возбуждение волн в грунте, регистрация колебаний осуществляется вертикальными геофонами. Оптимальные параметры расположения приемников, приемной линии, времени регистрации сигнала для различных условий приведены в [6]. На следующих двух этапах выполняется непосредственно анализ полученных данных.

Дисперсионный анализ включает в себя построение дисперсионных изображений и выделение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты с наибольшей энергией для данной моды). Наиболее часто применяемым методом построения дисперсионного изображения является метод фазового сдвига. Между выходным и входным сигналами возникает некоторая задержка во времени. Компенсация этой задержки осуществляется за счет энергии сдвига по фазовой компоненте для каждой спектральной компоненты исходного сигнала, предварительно обработанного быстрым преобразованием Фурье (БПФ). Подробный процесс дисперсионного анализа для активного метода при наличии только фундаментальной моды M_0 приведен в [7].

На последнем этапе производится инверсия дисперсионных кривых и построение профиля (1-D, 2-D, 3-D) поперечных скоростей волн ВЧР. Поверхностная волна Рэлея есть функция частоты (f), скоростей продольной (c_p) и поперечной (c_s) волн, плотности грунта (ρ) и толщины слоя (h) [2]. Процедура инверсии заключается в подборе такой дисперсионной кривой теоретической модели грунта, которая максимально совпадет с измеренной кривой. Чаще всего применяется метод Оккама [8], основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения теоретической дисперсионной кривой от измеренной. Подробный процесс инверсии разобран в [9]. Примеры итоговых профилей приведены на рис. 4. При наличии всех необходимых параметров можно получить деформационные характеристики грунта по вышеуказанным формулам (1)-(3).

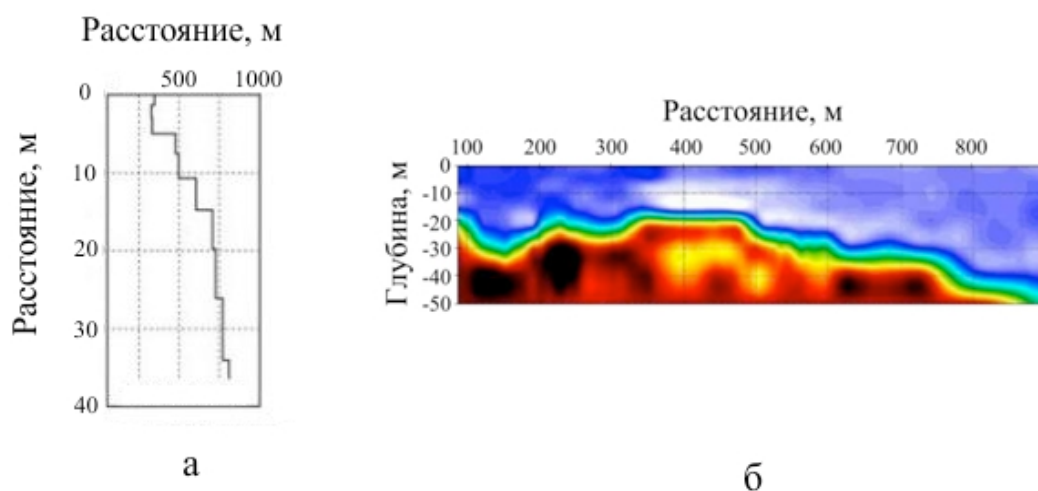


Рис. 4. Примеры профилей скоростей поперечных волн 1-D (а) и 2-D (б) [4]

Пассивный метод принципиально отличается от активного системой сбора данных, а также дисперсионным анализом. Источником колебаний могут являться различные физические явления окружающей среды (например, гром, прилив морских волн и т.п.), различная деятельность человека. В данном случае данные по местоположению источника колебаний неполные либо полностью отсутствуют, что не позволяет контролировать указанные выше исходные параметры (расстояние до источника, время возбуждения колебаний и мощность колебаний). При этом волны, возникающие от таких источников, имеют малую частоту и, соответственно, большую длину волны, что позволяет существенно увеличить глубину исследования. Согласно [10], воздействие морских приливов на грунт не превышает 1 Гц, а различная деятельность человека вызывает колебания частотой от 3 Гц. Также обычный автомобильный трафик вызывает колебания частотой от 5 Гц.

В общем случае, при наличии обширного свободного пространства применяется пассивный метод в двух плоскостях (2-D). Исследование в нескольких направлениях позволяет более точно оценить скорость поверхностной волны c_s [4]. Приемники в плане могут быть расположены в любой форме, но рекомендуется применять симметричные формы (квадрат, круг и пр.) (рис. 5). Применение ассиметричных форм не рекомендуется, так как результаты по разным плоскостям могут не совпадать, что может негативно сказаться на корректности итоговых результатов. Оптимальные параметры расположения массива приемников, времени записи и т.д. приведены в [6].

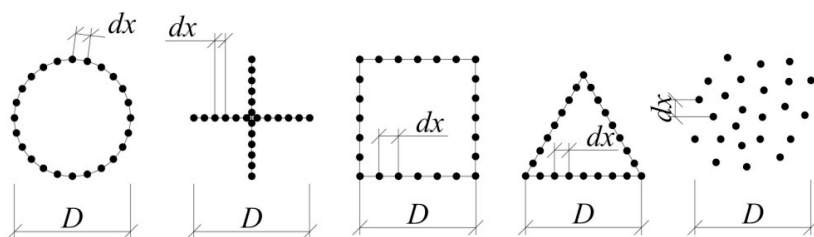


Рис. 5. Примеры схем расположения приемников при пассивном методе MASW [4]

В условиях плотной городской застройки часто недостаточно места для расположения системы приемников, размеры которой могут достигать 100 м и более. Поэтому выделяют частный случай – пассивный метод вдоль дорог в одной плоскости (1-D). Система приемников как при активном методе располагается вдоль дорожного полотна на некотором расстоянии от него (рис. 6). При данном методе достигается меньшая точность по сравнению с измерением в двух плоскостях (обычно расхождения не превышают 10%).

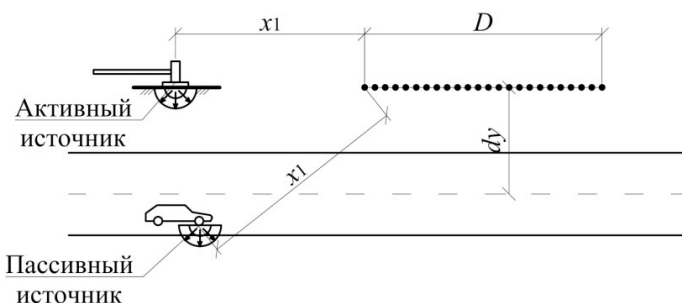


Рис. 6. Схема расположения приемной линии вдоль дорожного полотна

Приемники должны располагаться параллельно дороге с некоторым неизменным расстоянием от линии до центра дорожного полотна (допускается расхождение не более 30%). Рекомендуется не располагать вплотную к дороге. Оптимальные параметры также приведены в [6].

Как уже было отмечено, дисперсионный анализ для пассивного метода имеет некоторые отличия от анализа при активном методе. Он основывается на определении энергии фазового сдвига для различных азимутов (углов θ к векторам скоростей волн от различных источников, рис. 7) при неизвестном расстоянии до каждого конкретного источника. При значительном удалении системы приемников от источника, распространяемые поверхностные волны можно считать плоскими (рис. 7). Подробная процедура дисперсионного анализа для пассивного метода в общем случае приведена в [11].

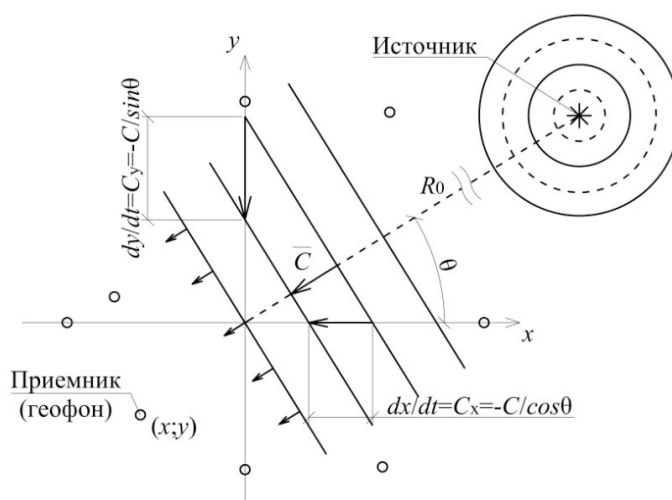


Рис. 7. Схема определения азимута (θ) для различных источников относительно центра приемной системы для пассивного метода MASW [3]

Для частного случая пассивного метода, когда приемная линия располагается вдоль автомобильной дороги, существуют два подхода. В первом случае используется предположение, как и в общем случае, что волна плоская. При втором подходе волна принимается сферической, при этом несколько меняется методика вычисления. Подробно процедуры анализа для частного случая MASW вдоль дороги представлены в [12].

Процесс инверсии для пассивного метода аналогичен инверсии при активном методе.

Для получения более полных результатов можно объединять данные, начиная с этапа дисперсионного анализа. При этом запись сигналов должна производиться раздельно. Колебания от пассивных источников имеют малую частоту и быстро затухают, что затрудняет запись при активном методе.

Совмещение результатов дает возможность точно оценить модальный порядок дисперсионных кривых при наличии нескольких мод [13]. Это значит, что для некоторых частот будут существовать несколько фазовых скоростей, меньшая из которых принимается за фундаментальную моду M_0 , а более высокие за моды высших порядков M_1 , M_2 и т.д. Конечное дисперсионное изображение будет являться суперпозицией мод. Однако для каждой моды амплитудные пики будут кардинально различны, что показывает необходимость перед сложением мод произвести их раздельный анализ [7]. Пример дисперсионного изображения с двумя модами представлен на рис. 8.

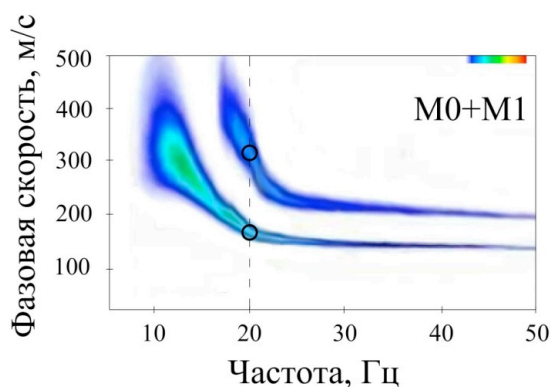
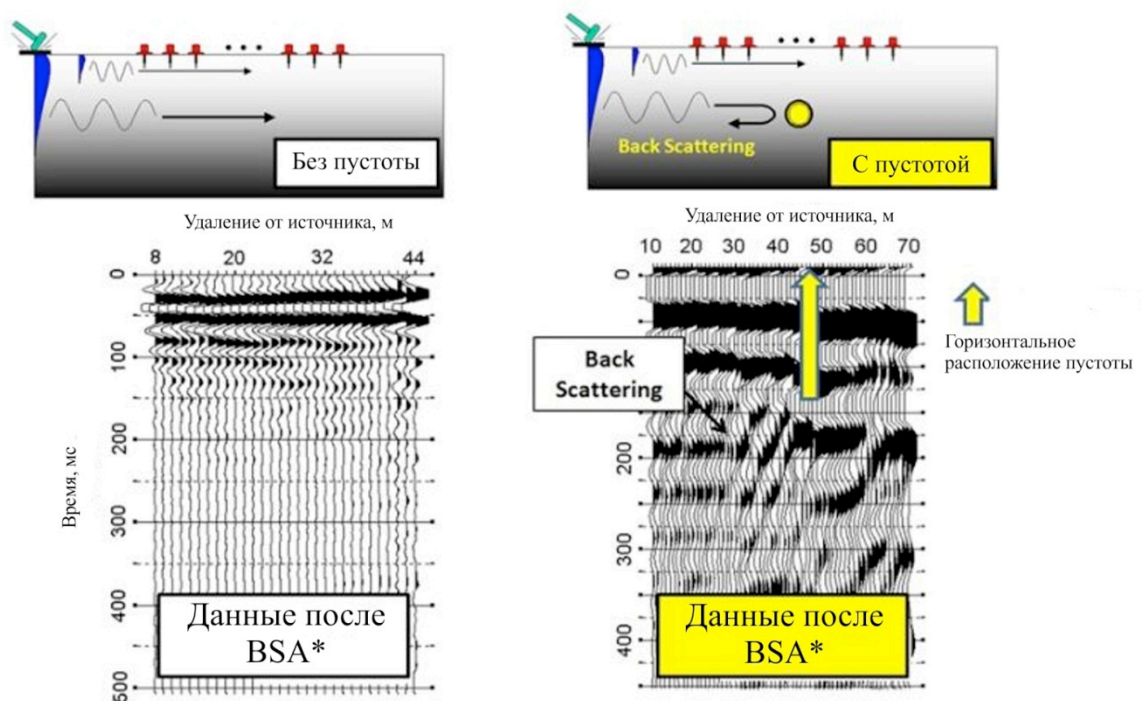


Рис. 8. Пример многомодального дисперсионного изображения [4]

Наиболее распространенным вариантом итоговых результатов является отображение в виде двухмерного профиля (рис. 4б), который отображает только общее изменение поперечных скоростей в исследуемой плоскости. Обнаружение различных аномалий в грунте оказывается затруднительным ввиду малой разрешающей способности такого изображения. Малые размеры самих аномалий по сравнению с исследуемой полосой также не оказывают существенного влияния на изменение поперечных скоростей. В этом случае предпочтительным является вывод результатов в виде одномерного профиля, который отражает дисперсионные свойства волн в большей мере, нежели двухмерный профиль. Однако малые размеры аномалий (к примеру, $D \leq 2dx$ для 24-канальной системы) также осложняют их обнаружение [14].

С другой стороны, малый объект может генерировать сильные отраженные поверхностные волны, как будто объект представляет новый точечный источник (рис. 9). Такие волны называются обратно отраженные или обратно рассеянные (back-scattering).



*Back-Scattering Analysis

Рис. 9. Появление обратно рассеянных волн на спектрограмме при наличии пустоты в грунте [14]

На рис. 9 функция, отображающая обратно рассеянные поверхностные волны, имеет противоположный наклон к функции распространения вынужденных колебаний. Определив местоположение начала (по времени) распространения функции отраженных волн можно найти горизонтальную координату расположения аномалии. Точность горизонтальной координаты составляет одному шагу приемников ($1dx$).

Глубина аномалии (Z_a) может быть оценена более точно. Экспериментальные данные показали, что при достижении длины поверхностной волны значения глубины верхней точки аномалии начинает возрастать амплитуда обратно рассеянных волн. Максимальное значение амплитуды обратных волн достигается при двойной глубине аномалии (рис. 10). При дальнейшем увеличении длины волны амплитуда обратных волн убывает.

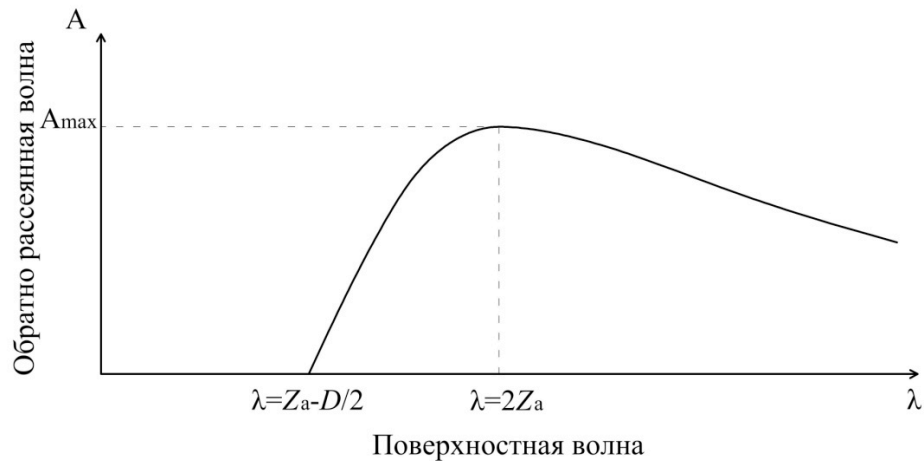


Рис. 10. График зависимости амплитуды обратно рассеянных волн от длины поверхностной волны [14]

Приблизительная глубина аномалии может быть найдена по формуле [14]:

$$Z_a = 0,5\lambda = 0,5 \frac{c_f}{f_a} \quad (4)$$

где λ – длина поверхностной волны; c_f – фазовая скорость распространения поверхностной волны; f_a – частота колебаний.

Верхняя граница пустоты может быть найдена путем последовательного увеличения частоты колебаний (уменьшения длины волны) с некоторым шагом до момента полного исчезновения обратно рассеянных волн. В точке, где амплитуда обратных волн стремится к нулю, будет располагаться приблизительная верхняя граница аномалии. Примерный диаметр аномалии может быть найден по формуле [14]:

$$D = 2 \left(Z_a - \frac{c_f}{f_a} \right) \quad (5)$$

где Z_a – глубина залегания пустоты; c_f – фазовая скорость распространения поверхностной волны; f_a – частота колебаний.

Аномалия может быть обнаружена только в случае, если длина волны больше либо равна глубине залегания аномалии (рис. 11). Это обусловлено глубиной распространения волны, которая приблизительно равняется одной длине волны. Минимальный диаметр регистрируемых пустот можно оценивать по эмпирической зависимости [14]:

$$D \geq 0,2Z_a \quad (6)$$

где Z_a – глубина залегания пустоты.

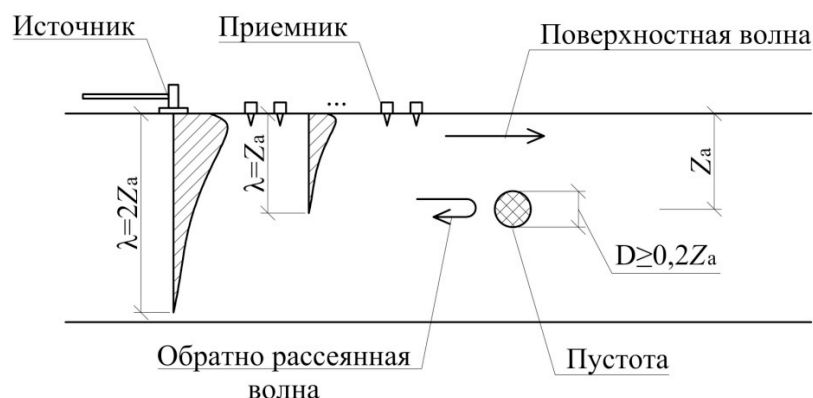


Рис. 11. Иллюстрация появления обратно рассеянных волн при длине волны равной двойной глубине залегания аномалии [14]

Неразрушающий характер метода MASW позволяет существенно сократить трудозатраты и стоимость проведения работы. Этот метод дает более обширную картину ВЧР, нежели скважинный метод, который предоставляет только точечную картину. Результаты многочисленных испытаний показывают, что расхождения результатов для MASW и скважинного метода незначительны. Использование дополнительного инструмента анализа (Back-Scattering Analysis) дает возможность засекать аномалии относительно малых размеров. Все вышеизложенное указывает на перспективность развития этого метода волнового анализа ЗМС ВЧР для геотехнических целей.

Библиографический список

1. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, no. 3. – P. 800–808.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – 2-е изд. – М.: Наука; Гл. редакция физ.-мат. Лит-ры, 1979. – С. 489–516.
3. Verruijt A. Soil dynamics. – Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2008. – 417 pp.
4. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.masw.com/> (дата обращения: 7.03.2016).
5. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction, in “Engineering Advances in Earthworks” // *Australian Geomechanics Society*. – 2007. – P. 71-81.
6. Park C.B., Miller R.D., Miura H. Optimum field parameters of an MASW survey // *Japanese Society of Exploration Geophysics (SEG-J) Extended Abstracts (22-23 May 2002)*. – Tokyo, Japan, 2002.
7. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record // *68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*. – 1998. – P. 1377–1380.
8. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam’s inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic seismic data // *Geophysics*. – 1987. – Vol. 52, no. 3. – P. 289–300.
9. Xia J., Miller R.D., Park C.B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, no. 3. – P. 691–700.

10. Okada H. The microtremor survey method // Geophysical monograph series. No. 12. – Tulsa, OK, USA: published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2003. – 135 p.
11. Park C. B., Miller, R.D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW) // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. – 2008. – Vol. 13, no.1. – P. 1–11.
12. Park C.B., Miller R.D., Ryden N. Roadside seismic survey utilizing traffic noise // Proceeding of the NDE Conference on Civil Engineering; 14–18 August 2006. – St. Louis, MO, USA, 2006. – P. 323–334.
13. Park C.B., Miller R.D., Ryden N. Combined use of active and passive surface waves // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. – 2005. – Vol. 10, no. 2. – P. 323–334.
14. ParkSEIS (PS) – Back-Scattering Analysis [Электронный ресурс] // URL: <http://www.parkseismic.com/PSBSACO.html> (дата обращения: 7.03.2016).

References

1. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800-808.
2. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. M., Nauka, Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1979, pp. 489-516.
3. Verruijt A. Soil dynamics. Delft, Netherlands, Delft University of Technology, 2008, 417 p.
4. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) [electronic resource]. URL: <http://www.masw.com/> (date of treatment: 7.03.2016).
5. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction. “*Engineering Advances in Earthworks*”, Australian Geomechanics Society, 2007, pp. 71-81.
6. Park C.B., Miller R.D., Miura H. Optimum field parameters of an MASW survey. *Japanese Society of Exploration Geophysics (SEG-J) Extended Abstracts (22-23 May 2002)*, Tokyo, Japan, 2002.
7. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Imaging dispersion curves of surface waves on multichannel record. *68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1998, pp. 1377-1380.
8. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic seismic data. *Geophysics*, 1987, vol. 52, no. 3, pp. 289-300.
9. Xia J., Miller R.D., Park C.B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 691-700.
10. Okada, H. The microtremor survey method. *Geophysical monograph series*, no. 12, Tulsa, OK, USA, published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2003, 135 p.
11. Park C. B., Miller, R.D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW), *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2008, vol. 13, no.1, pp. 1-11.
12. Park C.B., Miller R.D., Ryden N. Roadside seismic survey utilizing traffic noise. *Proceeding of the NDE Conference on Civil Engineering (14-18 August 2006)*, St. Louis, MO, USA, 2006, pp. 323-334.
13. Park C.B., Miller R.D., Ryden N. Combined use of active and passive surface waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 323-334.

14. ParkSEIS (PS) – Back-Scattering Analysis [electronic resource] // URL: <http://www.parkseismic.com/PSBSACO.html> (date of treatment: 7.03.2016).

Об авторах

Антипов Вадим Валерьевич (Пермь, Россия) – магистрант, специальность «Подземное и городское строительство», Строительный факультет, ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: seekerva@mail.ru)

Офрихтер Вадим Григорьевич (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», Строительный факультет, ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: ofrikhter@mail.ru)

About the authors

Antipov Vadim Valer'evich (Perm, Russia) – Master student, speciality «Underground and Urban Development», Civil Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, Russian Federation, e-mail: seekerva@mail.ru)

Ofrikhter Vadim Grigor'evich (Perm, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, Russian Federation, e-mail: ofrikhter@mail.ru)