



DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.04

УДК 624.131

## **СОВРЕМЕННЫЕ НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА**

**В.В. Антипов, В.Г. Офрихтер**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### **О СТАТЬЕ**

Получена: 03 февраля 2016  
Принята: 24 февраля 2016  
Опубликована: 30 июня 2016

#### *Ключевые слова:*

зона малых скоростей, инженерно-геологический разрез, волна Рэлея, неразрушающий метод, волновой анализ, спектральный анализ, SASW, многоканальный анализ, MASW

### **АННОТАЦИЯ**

Множество современных неразрушающих методов исследования зоны малых скоростей верхней части разреза активно совершенствуются и эффективно применяются за рубежом. 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 такая же, как и при использовании разрушающих методов. Целью статьи является обзор современных неразрушающих методов изучения инженерно-геологического разреза на основе волнового анализа зоны малых скоростей верхней части разреза. Такими методами являются спектральный анализ поверхностных волн (SASW) и многоканальный анализ поверхностных волн (MASW). Они основаны на использовании дисперсионных свойств поверхностных волн Рэлея. Волны Рэлея возникают на границе среда – воздух от различных источников. Колебания могут быть вызваны принудительно с помощью кувалды и металлической пластины или воздействием иных источников окружающей среды. Процедура применения обоих методов подробно рассмотрена на всех этапах проведения работ. Проанализирована измерительная система для проведения MASW и приведены рекомендации по расстановке приемников на исследуемой области. Также освещены этапы анализа полученных в полевых условиях данных и построения профиля поперечных скоростей для различных методов MASW: активный, пассивный в общем случае, пассивный вдоль дороги. В результате с помощью полученных профилей поперечных скоростей можно найти начальный модуль сдвига и начальный модуль упругости для оценки основания. Также представлены необходимые зависимости и примеры итоговых изображений.

© ПНИПУ

© Антипов Вадим Валерьевич – магистрант, e-mail: seekerva@mail.ru.

Офрихтер Вадим Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: ofrikhter@mail.ru.

Vadim V. Antipov – Master Student, e-mail: seekerva@mail.ru.

Vadim G. Ofrikhter – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: ofrikhter@mail.ru.

## MODERN NONDESTRUCTIVE METHOD OF RESEARCHING OF GEOLOGICAL-ENGINEERING SECTION

V.V. Antipov, V.G. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 03 February 2016  
Accepted: 24 February 2016  
Published: 30 June 2016

#### Keywords:

low-velocity zone, geological-engineering section, Rayleigh wave, nondestructive method, wave analysis, spectral analysis, SASW, multichannel analysis, MASW

### ABSTRACT

A lot of modern nondestructive methods of investigation of the low-velocity zone are actively improved and effectively applied abroad. In the absence of necessity to perform work on drilling the soil mass labor costs are significantly reduced. 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 modern nondestructive methods of investigation geological-engineering section which is based on the analysis of the low-velocity zone of the upper section. These methods include spectral analysis of surface waves (SASW) and multi-channel analysis of surface waves (MASW). They are based on dispersive properties of Rayleigh waves. Rayleigh waves arise at the boundaries of the medium-to-air from a variety of sources. Vibrations can be caused by a force with a sledgehammer and a metal plate or from influence of other environmental sources. The procedure for both methods considered in detail at every stage of the work. The measuring system for MASW is also considered in detail. Furthermore in the article there are recommendations for the placement of receivers in the investigated area. The analysis of field data and making the profile of transverse velocities are also described for different methods of MASW: active, passive, passive roadside. At the end the initial elastic modulus and initial shear modulus can be found by using the obtained profiles of transverse velocities. Necessary depending and examples of the resulting images are also presented in this article.

© PNRPU

## Введение

При возбуждении колебаний в упругой среде источником, находящимся вблизи поверхности, образуются два основных вида волн – объемные и поверхностные.

Объемные волны в упругих твердых средах распространяются в виде двух типов колебаний в зависимости от направления смещения частиц – продольные и поперечные. При прохождении продольной Р-волны частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны, происходят деформации объема. При прохождении поперечной S-волны частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, возникают деформации формы [1].

Поверхностные волны также разделяют в зависимости от плоскости колебания частиц на два типа – волны Лява и волны Рэлея. Волны Лява представляют собой поляризованные волны, в которой частицы колеблются вдоль поверхности среды перпендикулярно направлению распространения волны. Эти волны возникают в слоистой среде в случае, когда скорость волны в подстилающем слое ниже, чем в верхнем слое [1]. Волны Рэлея возникают вблизи свободной поверхности среды (среда – вакуум, среда – воздух). Колебание частиц происходит по направлению распространения волны в плоскости, перпендикулярной поверхности [1]. Оба указанных типа волн обладают дисперсией, т.е. зависимостью фазовой скорости от частоты [2].

Глубина распространения колебаний поверхностной волны прямо пропорциональна длине волны (обратно пропорциональна частоте). Графическое представление дисперсионных свойств показано на рис. 1. Волна с высокой частотой колебаний быстро затухает и имеет небольшую глубину распространения, а уменьшение частоты позволяет увеличить глубину распространения [2].

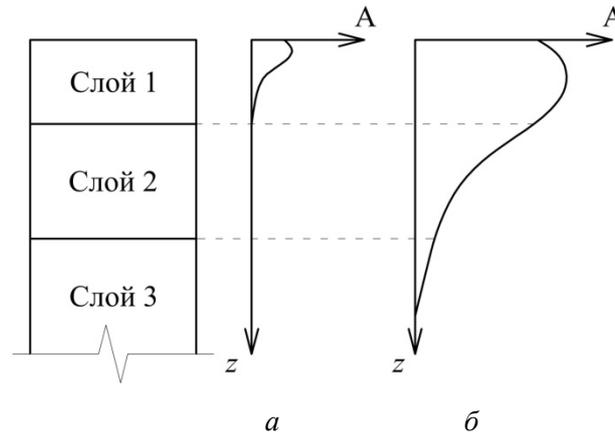


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебания частиц  $A$  от глубины распространения поверхностной волны  $z$  для высокочастотной волны (а) и низкочастотной волны (б) [3]

Fig. 1. The dependence of the amplitude  $A$  of oscillations of particles on the depth  $z$  of surface wave propagation for the high-frequency waves (а) and for low-frequency waves (б) [3]

Использование поверхностных волн Рэлея оказалось эффективным при волновом анализе зоны малых скоростей верхней части разреза. Основанные на их применении современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза (SASW и MASW) позволяют определить фазовые скорости спектральных компонент и построить вертикальный профиль скоростей поперечных волн.

## 1. Теория метода SASW

Метод спектрального анализа поверхностных волн (Spectral Analysis of Surface Waves – SASW) был впервые представлен в статье [4] в 1983 г. Запись сигналов колебаний поверхностных волн осуществляется с помощью одной или нескольких пар приемников. Затем производится выделение дисперсионной кривой эффективной скорости и построение профиля скоростей поперечных волн.

Скорость поперечных волн тесно связана с деформационными характеристиками грунтов, такими как модуль упругости и модуль сдвига [1, 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 P-волны;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность.

Приведенные зависимости позволяют на основе профиля поперечных скоростей получить начальный модуль сдвига и начальный модуль упругости и оценить пригодность основания для будущего здания или сооружения.

Спектральный анализ поверхностных волн обычно проводится в три этапа:

- 1) сбор полевых данных;
- 2) дисперсионный анализ;
- 3) инверсия.

Сбор полевых данных осуществляется с помощью системы из двух приемников (вертикальных геофонов) и записывающего устройства (рис. 2).

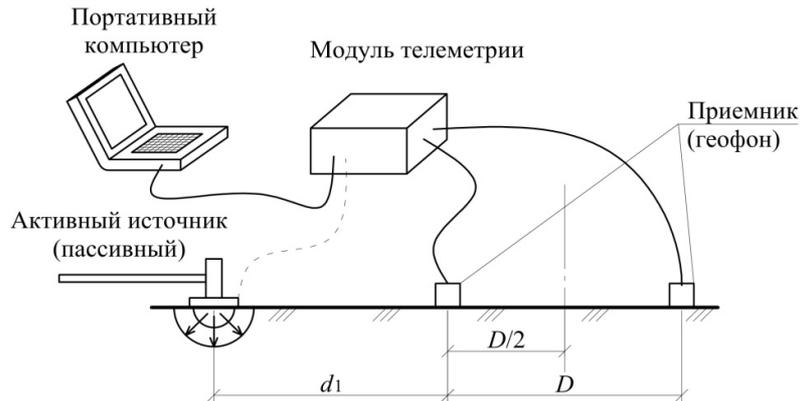


Рис. 2. Система регистрации поверхностных колебаний в методе SASW  
 Fig. 2. The registration system of surface oscillations for method SASW

Применяются геофоны с частотой от 1 до 4,5 Гц. Расстояние между приемниками  $D$  обычно принимается равным расстоянию от источника до ближайшего к нему приемника  $d_1$ . Для увеличения длины полосы замеров производится несколько перестановок приемников с увеличением расстояний  $D$  и  $d_1$  с некоторым шагом (либо используются несколько предварительно расставленных пар геофонов). Рекомендуется  $d_1$  и  $D$  принимать не более половины измеряемой длины волны [4]. Изменение замеряемых расстояний может осуществляться по двум схемам, представленным на рис. 3.

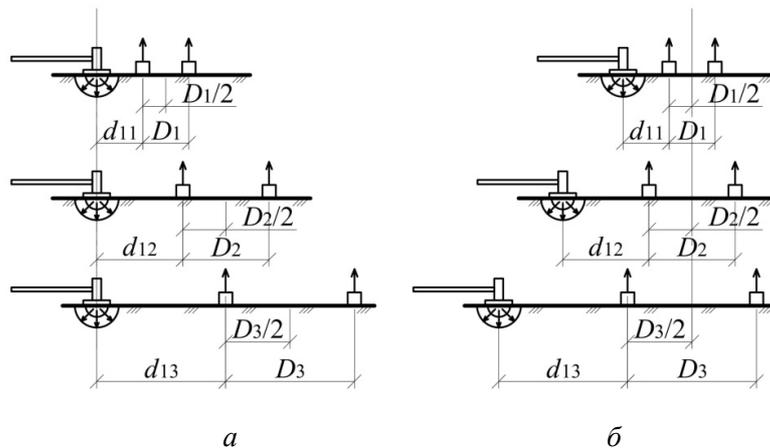


Рис. 3. Схема с фиксированным местоположением источника (а)  
 и схема с фиксированным центром пары приемников (б)  
 Fig. 3. The schemes with fixed source location (a)  
 and with fixed center of the pair of receivers (b)

В качестве источника может применяться специальное устройство для возбуждения колебаний (активный метод) или различные природные явления, деятельность человека (пассивный метод). При пассивном методе обычно отсутствуют конкретные данные о местоположении источника, мощности и времени его воздействия на грунтовое основание.

Полученные сигналы с геофонов передаются на записывающее устройство и затем обрабатываются с помощью специального программного обеспечения для получения дисперсионной кривой, отражающей зависимость фазовой скорости от частоты [4]. Процедура дисперсионного анализа подробно описана в работе [6].

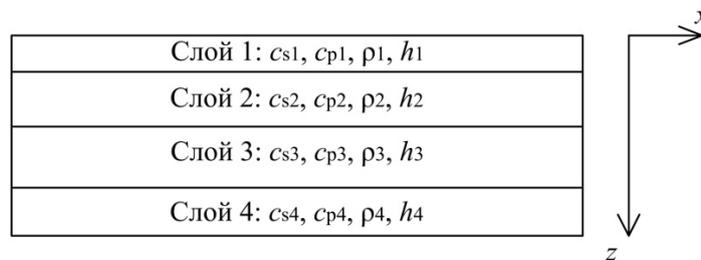


Рис. 4. Послойная модель грунтового массива  
Fig. 4. Layered model of soil

Затем по полученной дисперсионной кривой производится восстановление профиля поперечных скоростей грунта путем построения теоретической дисперсионной кривой, максимально совпадающей с измеренной кривой. Указанный процесс носит название инверсии (инверсионного анализа). Поэтапное описание инверсии по методу Оккама представлено в работах [7, 8]. При этом предполагается, что измеряемая толща грунта имеет послойную модель (рис. 4).

## 2. Теория метода MASW

Метод многоканального анализа поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) был впервые представлен в статье [9] журнала *Geophysics* в 1999 г. Производится регистрация поверхностных колебаний волн Рэлея от различных источников, затем анализ этих скоростей и построение профиля скоростей поперечных волн. Переход от скоростей поперечных волн к начальным деформационным характеристикам осуществляется с помощью зависимостей (1)–(3).

Многоканальный анализ поверхностных волн, как и спектральный анализ, проводится в три этапа:

- 1) сбор полевых данных;
- 2) дисперсионный анализ;
- 3) инверсия.

Для регистрации возникающих в грунтах колебаний чаще всего используется 24-канальная система из низкочастотных геофонов (4,5 Гц), соединенных с телеметрическим модулем. Полученные сейсмограммы передаются на портативный компьютер. Схема системы представлена на рис. 5.

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

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

При наличии всех вышеперечисленных параметров и их полном контроле применяется активный метод анализа. В качестве источника обычно используется кувалда 8–10 кг (рис. 5). При ударе кувалдой о металлическую пластину происходит возбуждение волн среды, колебания регистрируются вертикальными геофонами. В качестве источника могут применяться также иные приспособления.

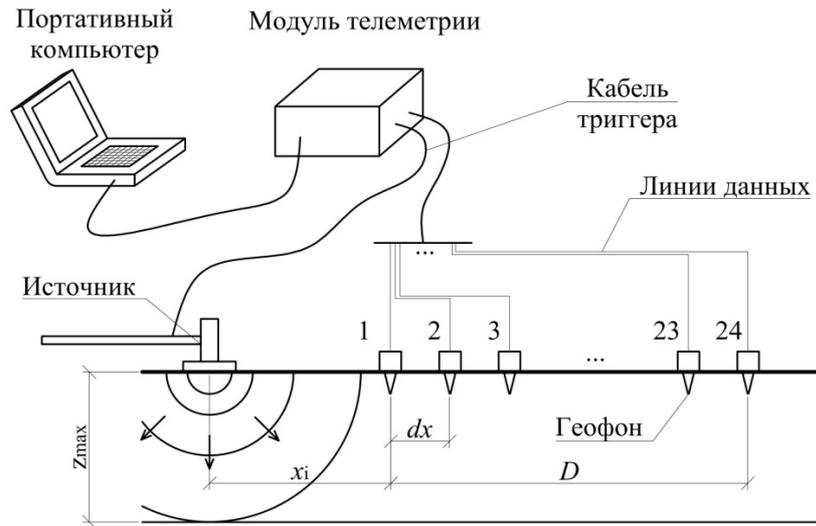


Рис. 5. Схема 24-канальной телеметрической системы при активном методе  
 Fig. 5 The scheme of 24 channel telemetric system in active method

Длина приемной линии [3]

$$D = mZ_{\max}, \quad (4)$$

где  $1 \leq m \leq 3$ , часто принимается равным 2, т.е.  $D = \lambda_{\max}$ ;  $Z$  – наибольшая глубина, на которой может быть восстановлена скорость поперечных волн,  $Z = 0,5\lambda_{\max}$ ;  $\lambda_{\max}$  – максимальная длина поверхностной волны.

Расстояние от источника до первого приемника ( $x_1$ ) принимается от  $0,2D$  до  $D$ . Диапазон расстановки геофонов ( $dx$ ) берется в интервале от  $1dx$  до  $12dx$ . Обычно для 24-канальной системы он берется  $1dx$  и принимается равным минимальной длине волны  $\lambda_{\min}$ . Тогда минимальная глубина исследования [3]

$$Z_{\min} = k\lambda_{\min}, \quad (5)$$

где  $0,3 \leq k \leq 1,0$ , зачастую принимается равным 0,5.

Запись сигналов чаще всего производят на протяжении  $T = 1$  с при интервале дискретизации  $dt = 1$  мс. Можно увеличить время записи на несколько секунд при малых скоростях поперечных волн, однако не рекомендуется вести запись более 5 с из-за повышения риска появления постороннего шума (например, от проезжающего автотранспорта) [10].

В случае отсутствия контроля за каким-либо из трех или за всеми параметрами (расстояние до источника, время возбуждения колебаний и мощность колебаний) применяется пассивный метод MASW.

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.), деятельность человека. При этом волны, возникающие от таких источников, имеют малую частоту и, соответственно, большую длину волны, что позволяет существенно увеличить глубину исследуемой толщи. Согласно [11] 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 (2D). Исследование в нескольких направлениях позволяет более точно оценить скорость поверхностной волны  $c_s$  [3]. Приемники в плане могут быть расположены в любой форме, но рекомендуется применять симметричные формы (квадрат, круг и пр.) (рис. 6). Применение асимметричных форм не рекомендуется, так как результаты по разным плоскостям могут не совпадать, что может негативно сказаться на корректности итоговых результатов.

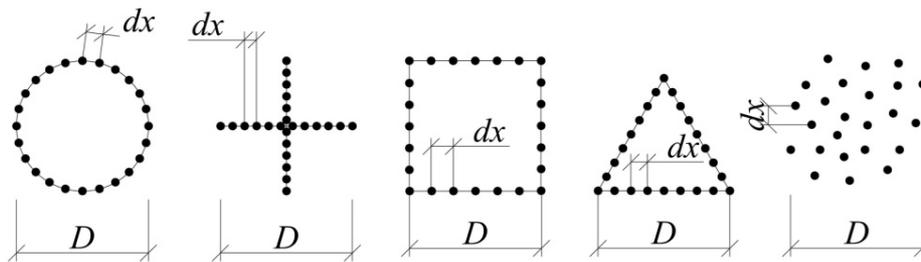


Рис. 6. Примеры схем расположения приемников при пассивном методе MASW [3]

Fig. 6. Examples of receivers' locations in passive MASW [3]

Сравнительный анализ различных форм расположения приемников на данный момент отсутствует. Однако по многочисленным натурным испытаниям уже сделан вывод, что результаты в каждом случае различаются незначительно [3].

Размер массива геофонов ( $D$ ) определяется так же, как и в активном методе, по формуле (6). Расстояние между приемниками зависит от числа каналов ( $N$ ) и определяется для каждой конкретной формы индивидуально. Например, для массива в виде окружности размер  $D$  равен диаметру [3], тогда

$$dx = \frac{D\pi}{N}, \quad (6)$$

где  $N$  – число каналов системы.

Тогда минимальная глубина исследования составит [3]:

$$Z_{\min} = pdx, \quad (7)$$

где  $1/3 \leq p \leq 1,0$ .

Время записи принимается таким образом, чтобы в этот временной интервал попадала как минимум одна поверхностная волна от пассивных источников. Поэтому общее время  $T$  может варьироваться от конкретных условий места исследования. В городских условиях рекомендуется принимать интервал дискретизации  $dt = 4$  мс и общее время записи  $T = 10$  с [10].

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 (1D). Система приемников, как при активном методе, располагается вдоль дорожного полотна на некотором расстоянии от него (рис. 7). При данном методе достигается меньшая точность по сравнению с измерением в двух плоскостях (обычно расхождения не превышают 10 %).

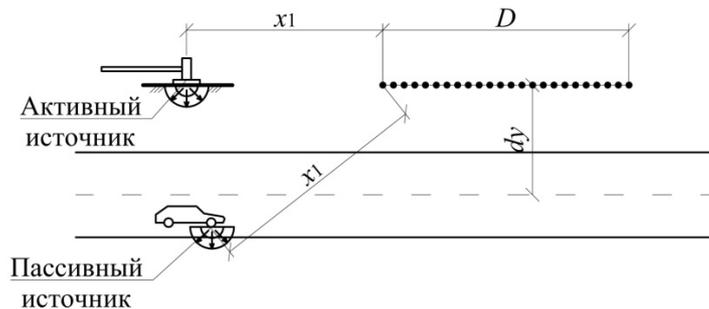


Рис. 7. Схема расположения приемной линии вдоль дорожного полотна  
Fig. 7. The scheme of location of receivers' line along the roadside

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. Размер приемной линии ( $D$ ) определяется также по формуле (4). Шаг геофонов ( $dx$ ) также зависит от числа каналов и в данном случае принимается с округлением до целого числа [3]:

$$dx = \frac{D}{N}. \quad (8)$$

Для более точных результатов рекомендуется принимать большее число каналов (48). Время записи и время дискретизации принимаются так же, как в общем случае.

Часто бывает полезно комбинировать активный и пассивный метод для получения более полных результатов. При этом запись сигналов производится отдельно для каждого метода ввиду различной частоты колебаний от источников. Колебания от пассивных источников имеют малую частоту и быстро затухают, что затрудняет запись при активном методе. Объединение результатов на последних этапах позволяет получить обширную картину скоростей волн разреза на малых и больших глубинах. Также совмещение результатов дает возможность точно оценить модальный порядок дисперсионных кривых [12].

Следующий этап, дисперсионный анализ, включает в себя построение дисперсионных изображений и выделение дисперсионных кривых (зависимостей фазовой скорости от частоты с наибольшей энергией для данной моды). Для активного и пассивного метода дисперсионный анализ отличается по причине различной полноты начальных данных.

Существуют несколько отличных друг от друга методов дисперсионного анализа:  $f-k$  (частота – волновое число) метод, метод фазового сдвига и др. Наиболее часто применяемый метод фазового сдвига позволяет получать более высокое разрешение изображения по сравнению с другими методами [3].

Дисперсионный анализ по методу фазового сдвига состоит из двух этапов. На первом, предварительном, этапе полученная на стадии полевого сбора данных спектрограмма сигнала обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и раскладывается на отдельные частотные составляющие с нормализацией по амплитуде. На втором этапе осуществляется непосредственное построение дисперсионного изображения. Сигнал на выходе измерительной системы идет с некоторым отставанием во времени от входного сигнала. Компенсация временной задержки осуществляется за счет энергии сдвига по фазовой компоненте, причем для каждой спектральной компоненты она различна [6]. Суммарная энергия вычисляется для каждой конкретной частоты в некотором скоростном диапазоне и отображается на дисперсионном изображении. Подробный процесс дисперсионного анализа для активного метода при наличии только фундаментальной моды  $M_0$  приведен в работе [6].

В случае сигнала с несколькими модами или появления других типов волн при сборе данных производится выделение нескольких мод на конечном дисперсионном изображении. 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 отдельный анализ [6]. Пример дисперсионного изображения с двумя модами представлен на рис. 8.

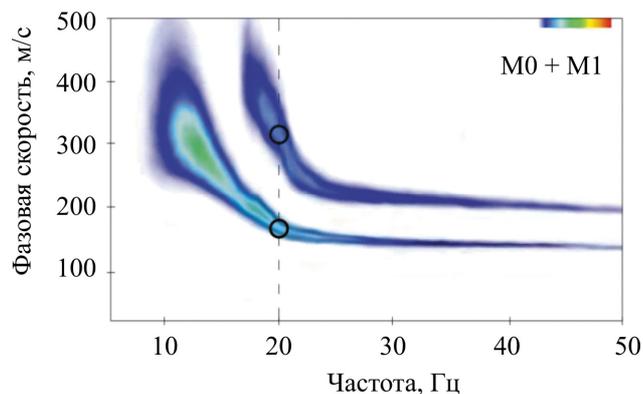


Рис. 8. Пример многомодального дисперсионного изображения [3]  
Fig. 8. The example of multimode dispersion image [3]

Как было отмечено выше, дисперсионный анализ для пассивного метода имеет некоторые отличия от анализа при активном методе. Он основывается на определении энергии фазового сдвига для различных азимуты (углов  $\theta$  к векторам скоростей волн от различных источников, рис. 9) при неизвестном расстоянии до каждого конкретного источника. Согласно модели, предложенной в [13], при значительном удалении системы приемников от источника распространяемые поверхностные волны можно считать плоскими (см. рис. 9).

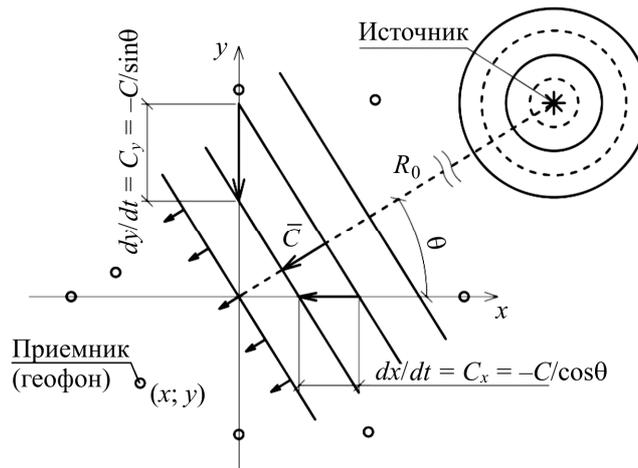


Рис. 9. Схема определения азимута ( $\theta$ ) для различных источников относительно центра приемной системы для пассивного метода MASW [3]  
 Fig. 9. The scheme of determine the azimuth ( $\theta$ ) for various sources regarding the center of receiving system for the passive MASW [3]

Вначале производится разделение сигналов на отдельные частотные компоненты с помощью БПФ по времени. Затем рассчитывается суммарная энергия фазового сдвига при конкретной частоте для различных азимутов  $\theta$  и фазовых скоростей  $c$  в принятом диапазоне значений  $c$  с некоторым шагом. Далее вычисленные значения энергий отображают на графике азимут – фазовая скорость. Все значения энергий суммируются по оси азимута и выводятся в кривую зависимости энергии от фазовой скорости. Вышеперечисленные шаги повторяются для различных частот в принятом диапазоне, в результате чего получают дисперсионное изображение, на котором в конечном итоге выделяют дисперсионные кривые [13].

Для частного случая пассивного метода, когда приемная линия располагается вдоль автомобильной дороги, существуют два подхода. Первым подходом является вышеописанная методика для пассивного метода в предположении, что волна плоская (рис. 10). Диапазон изменения азимута  $\theta$  в данном случае  $180^\circ$ . При этом приемная линия должна находиться на значительном удалении от центра дороги ( $dy = 5 \dots 10D$ , где  $D$  – длина приемной линии). Данный подход также используется при наличии в окрестности нескольких дорог, проходящих под различными углами. Формулы для вычисления суммарной энергии приведены в [13].

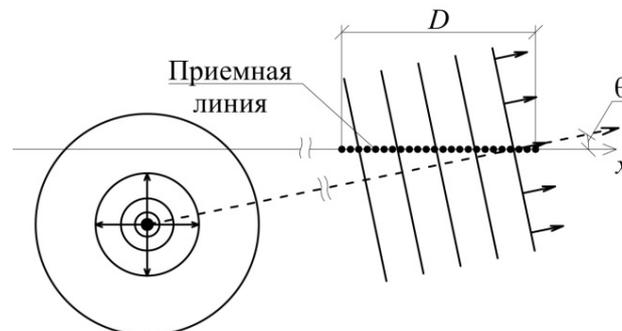


Рис. 10. Схема определения азимута при расположении приемной линии вдоль дороги на значительном расстоянии [14]  
 Fig. 10. The scheme of determine the azimuth at the location of the receiving line along the road at a distance [14]

При втором подходе распространяющаяся волна принимается сферической (рис. 11, а). Данный подход может применяться в случае наличия в окрестности только одной крупной дороги, причем она должна быть достаточно прямой. Методика дисперсионного анализа в этом случае несколько меняется. Изменения заключаются в отличии фазовых сдвигов для каждого приемника из-за разных расстояний до источника и разной временной задержки (рис. 11, б) [13].

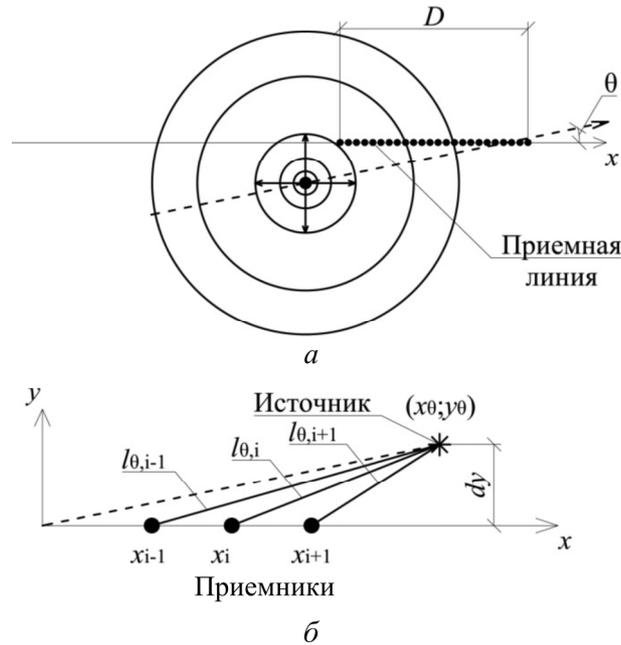


Рис. 11. Схема определения азимута и расстояния до источника при расположении приемной линии вдоль дороги в предположении, что волна сферическая (а); схема определения расстояния от источника до конкретного приемника (б) [14]

Fig. 11. The scheme of determine the azimuth and distance to the source at the location of the receiver line along the road, assuming that the wave is spherical (a); the scheme of determine the distance from the source to the particular receiver (b) [14]

Заключительным этапом MASW является инверсия дисперсионных кривых и построение профиля (1D, 2D, 3D) поперечных скоростей волн верхней части разреза (ВЧР). Поверхностная волна Рэлея есть функция частоты ( $f$ ), скоростей продольной ( $c_p$ ) и поперечной ( $c_s$ ) волн, плотности грунта ( $\rho$ ) и толщины слоя ( $h$ ) [2]. При этом для исследуемой толщи грунта принимается послойная модель (см. рис. 4). Процедура инверсии заключается в подборе такой дисперсионной кривой теоретической модели грунта, которая максимально совпадет с измеренной кривой. Приближение осуществляется за счет изменения скоростей продольной и поперечной волн, плотности и мощности слоя.

Существуют несколько методов инверсии: модель многочленов, метод Оккама [7], метод SQP и метод FSA [15]. Чаще всего применяется метод Оккама, основанный на минимизации среднеквадратичного отклонения теоретической дисперсионной кривой от измеренной. Подробный процесс инверсии разобран в [8]. После того как получена кривая, максимально совпадающая с измеренной, производится построение профиля поперечных скоростей. Пример такого профиля приведен на рис. 12. При наличии всех необходимых параметров можно получить деформационные характеристики грунта по вышеуказанным формулам (1)–(3).

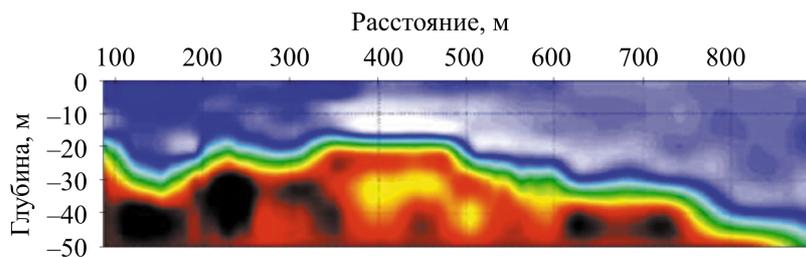


Рис. 12. Пример профиля скоростей поперечных волн [3]

Fig. 12. The example of profile of shear wave velocities [3]

Методы SASW и MASW имеют ряд преимуществ. Во-первых, они являются неразрушающими методами, что существенно сокращает трудозатраты и стоимость их проведения. Во-вторых, в отличие от скважинных измерений, которые представляют точечную картину ВЧР, неразрушающие методы волнового анализа дают обширное изображение ВЧР для всей измеряемой области. В-третьих, по результатам многочисленных испытаний сделан вывод о незначительных расхождениях результатов волнового анализа по сравнению со скважинным методом [3]. Все это показывает перспективность развития данных неразрушающих методов волнового анализа зоны малых скоростей ВЧР для геотехнических целей в РФ.

### Библиографический список

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
2. Verruijt A. Soil dynamics. – Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2008. – 417 p.
3. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). – URL: <http://www.masw.com/> (accessed 20.12.2015).
4. Nazarian S., Stokoe K.H., Hudson W.R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems // Transp. Res. Rec., Washington DC. – 1983. – Vol. 930. – P. 38–45.
5. Suto K. Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction // Engineering Advances in Earthworks / Australian Geomechanics Society. – 2007. – P. 71–81.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. – 1999. – Vol. 64, no. 3. – P. 800–808.
10. 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.
11. Okada H. The microtremor survey method // Geophysical monograph series, no. 12. – Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2003. – 135 p.

12. Combined use of active and passive surface waves / C.B. Park, R.D. Miller, N. Ryden, J. Xia, J. Ivanov // *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. – 2005. – Vol. 10, no. 2. – P. 323–334.
13. 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.
14. 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.
15. Ryden N., Park C.B. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71, no. 4. – P. 49–58.

## References

1. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriia uprugosti [Theory of elasticity]*. Moscow: Nauka, 1979. 560 p.
2. Verruijt A. *Soil dynamics*. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2008. 417 p.
3. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), available at: <http://www.masw.com/> (accessed 20 December 2015).
4. Nazarian S., Stokoe K.H., Hudson W.R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transp. Res. Rec.* Washington DC, USA, 1983, vol. 930, pp. 38-45.
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., Xia J. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 1998, pp. 1377-1380.
7. 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.
8. 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.
9. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 3, pp. 800-808.
10. 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.
11. Okada H. The microtremor survey method. *Geophysical monograph series, no. 12*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 2003. 135 p.
12. Park C.B., Miller R.D., Ryden N., Xia J., Ivanov J. Combined use of active and passive surface waves. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 323-334.
13. 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.
14. 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.
15. Ryden N., Park C.B. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra. *Geophysics*, 2006, vol. 71, no. 4, pp. 49-58.