

*Р. А. Ефремов<sup>1,2,3\*</sup>, А. В. Яблоков<sup>1,2,3</sup>*

## **Исследование алгоритмов обработки пассивных данных поверхностных волн для определения скоростной модели грунтов**

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

\*e-mail: r.efremov2@g.nsu.ru

**Аннотация.** В данной работе исследуется влияние системы наблюдения на точность извлекаемой дисперсионной кривой при пассивном анализе поверхностных волн в случае случайно распределенных источников. Рассматриваются различные системы расстановки приемников: линейный профиль вдоль оси X, линейный профиль вдоль оси Y, перекрестие, случайное распределение, круг и треугольник. Результаты исследования показывают, что двумерные системы наблюдения, такие как случайное распределение и круговая система, обеспечивают более точное определение дисперсионной кривой по сравнению с линейными системами наблюдения. Они имеют меньшую среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) для всех типов моделей. Особенно на низких частотах случайное распределение показывает наиболее точные результаты. Также было обнаружено, что линейные системы наблюдения и перекрестие неспособны достоверно восстановить дисперсионную кривую в области низких частот, где фундаментальная мода почти не прослеживается.

**Ключевые слова:** пассивные сейсмические наблюдения, дисперсионные кривые, система наблюдений, зона вечной мерзлоты, инженерная сейсморазведка

*R. A. Efremov<sup>1,2,3\*</sup>, A. V. Yablokov<sup>1,2,3</sup>*

## **Investigation of algorithms for processing passive surface wave data to determine the velocity model of soils**

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

\*e-mail: r.efremov2@g.nsu.ru

**Abstract.** In this paper, the influence of the acquisition system on the accuracy of the obtained dispersion curve in the passive analysis of surface waves in the case of random distributed sources is investigated. Various receiver placement systems are considered: a linear profile along the X axis, a linear profile along the Y axis, a crosshair, a random distribution, a circle and a triangle. The results of the study show that two-dimensional observation systems, such as a random distribution and a circular system, provide a more accurate definition of the dispersion curve compared to linear observation systems. They have a lower average absolute percentage error (MAPE) for all types of models. Especially at low frequencies, the random distribution shows the most accurate results. It was also found that linear observation systems and crosshairs are unable to reliably reconstruct the dispersion curve in the low frequency region, where the fundamental mode is almost not traceable.

**Keywords:** passive seismic observations, dispersion curves, observation system, permafrost zone, engineering seismic exploration

## *Введение*

Рост темпа освоения земных недр и строительства различных инфраструктурных объектов в зоне многолетнемерзлых пород (ММГ) обуславливает актуальность развития сейсмических методов мониторинга грунтов. Частое проведение активных сейсмических работ требует больших ресурсных вложений. Дополнение таких работ методами пассивного анализа поверхностных волн дает возможность автоматизировать процесс мониторинга физико-механических свойств грунтов с меньшими затратами [3]. Методы анализа пассивных данных поверхностных волн основаны на регистрации естественного и техногенного шума (тремора) и позволяют охватить большие территории исследования [8].

Существуют различные подходы к извлечению дисперсионных характеристик поверхностных волн из записи окружающего шума. Основные из них: метод рефракции микротремора (ReMi) [4], пассивный удалённый многоканальный анализ поверхностных волн (Passive Remote MASW) [7], метод пространственной автокорреляции (SPAC) [1], многоканальный анализ пассивных поверхностных волн (MAPS) [2], спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент (HVSR) [5]. Каждый подход к анализу сейсмического шума показал работоспособность и возможность получать дисперсионные характеристики изучаемого участка.

Для наиболее точного анализа пассивных поверхностных волн любого происхождения необходимо использовать площадную систему наблюдений, поскольку отклик среды регистрируется на разных азимутах, например, в виде круга или креста [7]. Однако такой метод требует наличия открытой просторной площади для размещения приемников, что не всегда доступно в городских условиях. В связи с чем, активно исследовалась возможность использования линейных систем наблюдения [6].

В текущей работе рассматривается влияние системы наблюдения на точность получаемой дисперсионной кривой в зависимости от типа скоростной модели: модель с положительным градиентом скорости; среда с высокоскоростным верхним слоем, моделируя промерзание; среда с высокоскоростным вторым слоем, моделируя оттаивание верхнего слоя. Также рассматриваются следующие системы наблюдения: линейная, перекрестье, круговая, треугольная и случайное распределение приёмников.

## *Генерация синтетических данных*

Расчёт синтетических данных пассивного наблюдения осуществлялся с использованием программного пакета *sofi3d*. Данный пакет реализует решение системы уравнений упругости в трёхмерном пространстве, используя конечно-разностную схему аппроксимации производной.

Система наблюдения состоит из 2500 пунктов приёма трёхкомпонентных данных, пункты приёма распределены на поверхности по квадратной сетке с шагом 1 м, частота дискретизации сигнала 200 Гц, длина записи 1 минута. Сейсмический шум моделировался равномерным распределением источников по пространству, времени срабатывания, амплитуде и доминантной частоте сигнала. В качестве источника выступала вертикальная сила. Моделирование выполнялось для трёх разных скоростных моделей, состоящих из трёх слоёв и полупространства, их параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделей среды

| Модель | Слой | Истинные значения |             |             |                               |
|--------|------|-------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
|        |      | $V_S$ (м/с)       | Глубина (м) | $V_P$ (м/с) | $\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> ) |
| А      | 1    | 400               | 6           | 680         | 1950                          |
|        | 2    | 600               | 13          | 1020        | 2100                          |
|        | 3    | 800               | 15          | 1360        | 2200                          |
|        | 4    | 1000              | $\infty$    | 1700        | 2300                          |
| В      | 1    | 950               | 6           | 1615        | 2300                          |
|        | 2    | 600               | 13          | 1020        | 2150                          |
|        | 3    | 800               | 15          | 1360        | 2250                          |
|        | 4    | 1000              | $\infty$    | 1700        | 2350                          |
| С      | 1    | 400               | 6           | 680         | 1950                          |
|        | 2    | 950               | 13          | 1615        | 2300                          |
|        | 3    | 800               | 15          | 1360        | 2200                          |
|        | 4    | 1000              | $\infty$    | 1700        | 2300                          |

### *Описание метода Passive Remote MASW (PRMASW)*

Данный метод использует записи площадной системы наблюдений, которая представима в виде двумерного распределения приёмников. Такие системы представлены фигурами, такими как круг, квадрат, треугольник, перекрестье и равномерное случайное распределение приёмников. Ожидается, что это приведёт к более точному определению дисперсионной кривой фазовых скоростей по сравнению с линейными система наблюдений, поскольку отклик среды регистрируется на разных азимутах.

Энергия регистрируемой поверхностной волны зависит от фазовой скорости, частоты и азимута. Фазовая скорость определяется как скорость перемещения точки с постоянной фазой. Алгоритм расчёта дисперсионного изображения фазовых скоростей по пассивным данным состоит в следующем: вычисляется фазовый сдвиг  $\phi$  согласно уравнениям (2) и (3) на заданной частоте ( $\omega$ ), фазовой скорости ( $C$ ), азимуте ( $\theta$ ) для двух горизонтальных компонент ( $x$ ,  $y$ ); записи от каждого приёмника  $r_k(x,y,t)$  трансформируются в частотную область, используя быстрое преобразование Фурье (4); сдвигается фаза частотного представления

записи  $R_k(x, y, t)$  посредством умножением на комплексную экспоненту; результат суммируется по всем приемникам (1). Для того, чтобы получить изображение  $\nu f$ -спектра необходимо просуммировать по всем азимутам  $\theta$ .

$$E_{2-D}(\omega, C, \theta) = \left| \sum_{k=1}^N e^{i\varphi_x} e^{i\varphi_y} R_k(x, y, \omega) \right|, \quad (1)$$

$$\varphi_x = -\frac{\omega x \cos \theta}{C}, \quad (2)$$

$$\varphi_y = -\frac{\omega y \sin \theta}{C}, \quad (3)$$

$$R_k(x, y, \omega) = FFT[r_k(x, y, t)]. \quad (4)$$

Обработка синтетических данных выполнялась в окнах по 500 отсчётов. В расчёте использовались частоты от 0 до 100 Гц (частота Найквиста), фазовые скорости от 50 до 1 500 м/с, азимуты выбирались в диапазоне от 0 до 360°. Пример рассчитанного  $\nu f$ -спектра изображен на рис. 1.

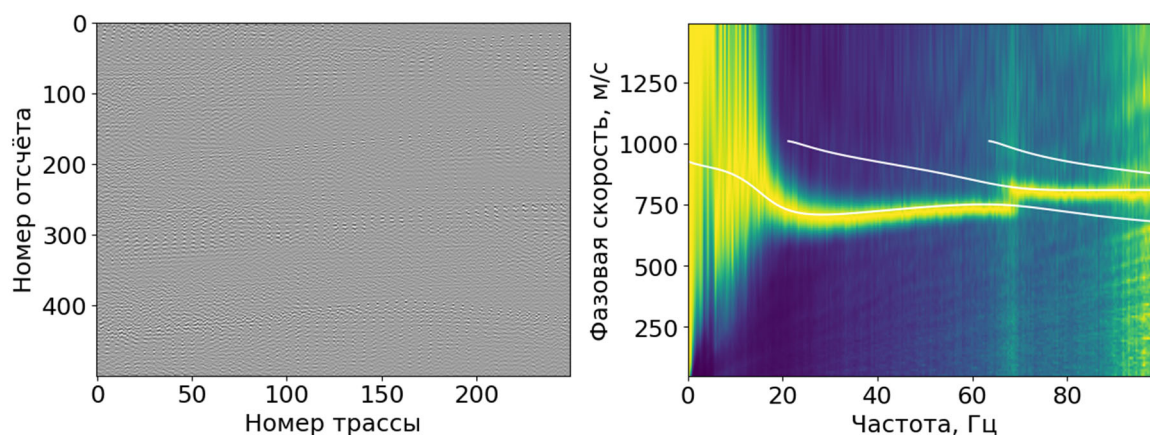


Рис. 1. Пример записи сейсмического шума (слева), изображение  $\nu f$ -спектра (справа) (белые линии – аналитически рассчитанные дисперсионные кривые), модель В

### Результаты синтетических экспериментов

Исходная система наблюдения состояла из 2 500 приёмников, 50 вдоль оси X и 50 вдоль оси Y. Для тестов были выбраны следующие системы наблюдения: линейный профиль вдоль оси X, линейный профиль вдоль оси Y, перекрестье, случайное распределение, треугольник и круг (вследствие равномерности исходной сетки некоторые приёмники незначительно отклоняются от величины радиуса – 50 м). Все системы наблюдения представлены на рис. 2. Из предыдущих исследований ожидается, что двумерное распределение приёмников позволит получать более достоверное дисперсионное изображение, поскольку отклик среды регистрируется на разных азимутах.

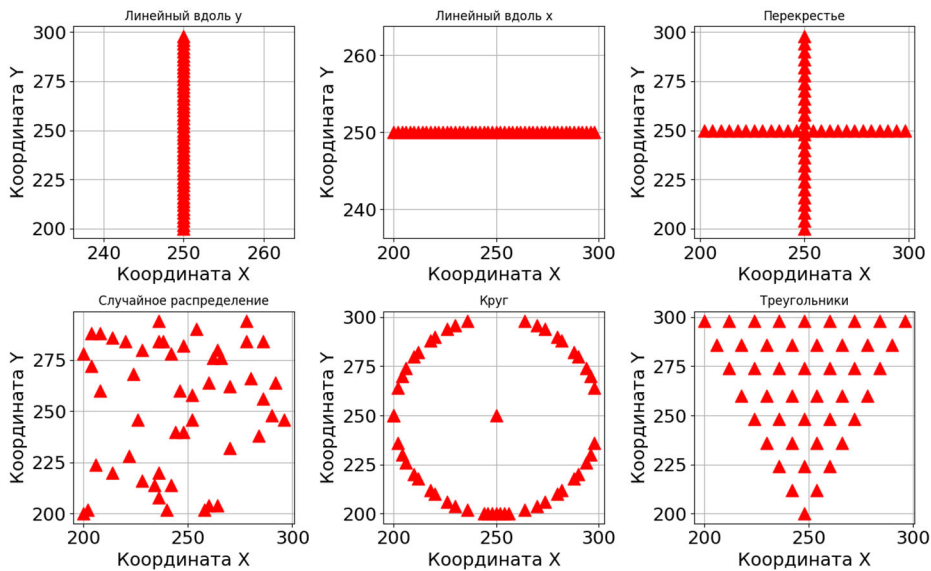


Рис. 2. Рассматриваемые системы наблюдения пассивных данных

Запись шума была разделена на окна по 500 отсчётов, для каждого окна был применён метод PRMASW описанный выше. Для каждой системы наблюдений было рассчитано распределение энергии от частоты, фазовой скорости и азимута, для получения дисперсионного изображения выполнялось суммирование по всем азимутам, по дисперсионным изображениям были получены дисперсионные кривые. Сравнения для каждой модели представлены на рисунках 3-5. МАРЕ между наблюдаемыми дисперсионными кривыми показано в таблице 2.

Пикирование дисперсионных кривых происходило путём автоматического определения максимума амплитуды изображения вдоль каждой частоты, это привело к тому, что ниже 20 Гц пикировалась первая высшая мода.

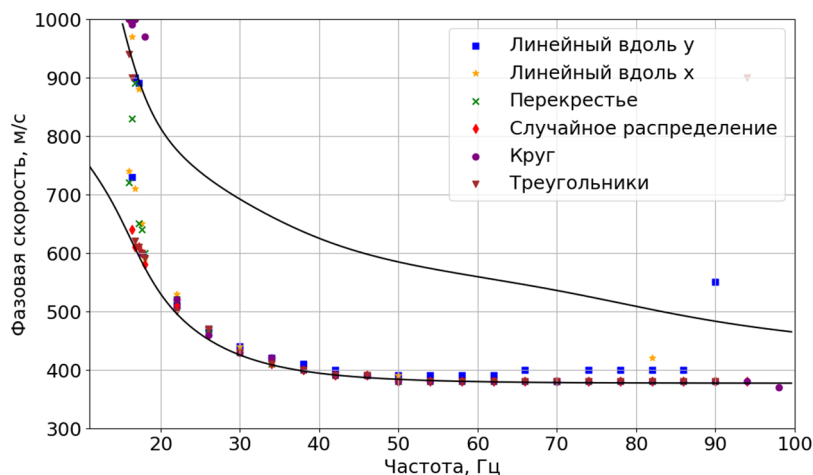


Рис. 3. Сопоставление аналитических дисперсионных кривых (черные кривые) и полученных входе обработки шума для различных систем наблюдения (цветные кривые). Модель А

По полученным результатам можно отметить, что случайное распределение не дают ложных определений на низких частотах, для первой высшей моды. Также можно заключить, что линейные профили завышают значения скорости на высоких частотах.

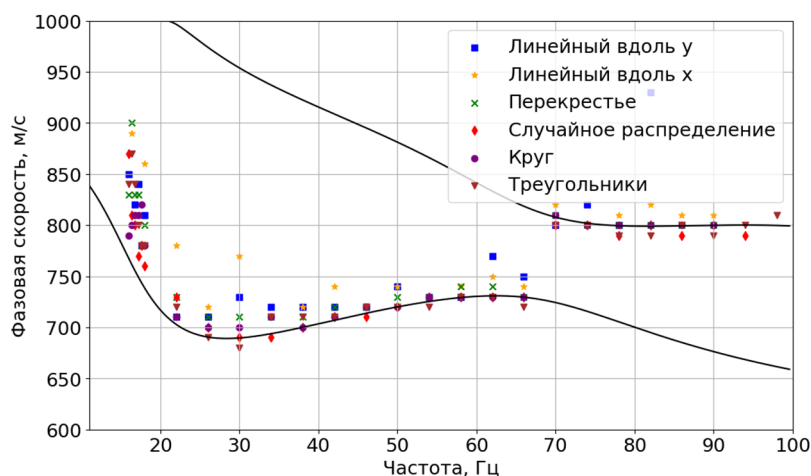


Рис. 4. Сопоставление аналитических дисперсионных кривых (черные кривые) и полученных входе обработки шума для различных систем наблюдения (цветные кривые). Модель В

В этом случае фундаментальная мода имеет низкую амплитуду на высоких частотах, свыше 70 Гц. Для всех частот двумерные системы наблюдения имеют более точное определение дисперсионных кривых фундаментальной и первой высшей моды.

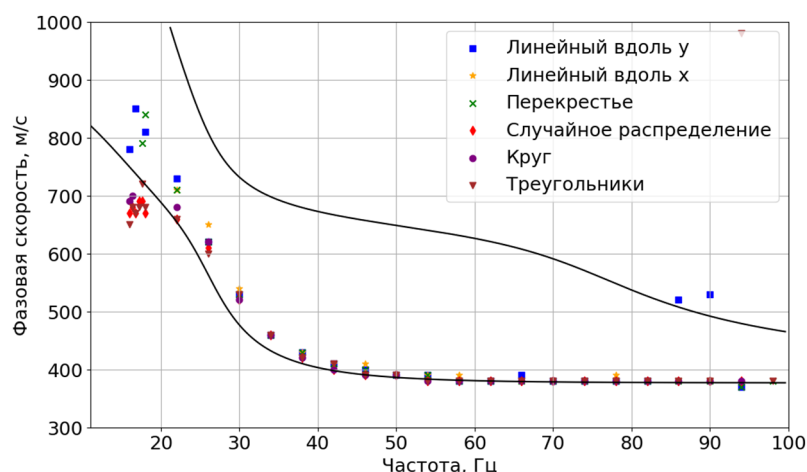


Рис. 5. Сопоставление аналитических дисперсионных кривых (черные кривые) и полученных входе обработки шума для различных систем наблюдения (цветные кривые). Модель С

Линейные системы наблюдения и перекрестье неспособны достоверно восстановить дисперсионную кривую в области низких частот, поскольку там фундаментальная мода почти не прослеживается. Случайное распределение, круговая и треугольная системы наблюдения обеспечивают наиболее точное определение дисперсионной кривой.

*Таблица 2*

Ошибка MAPE между наблюдаемыми дисперсионными кривыми

|                     | Профиль<br>вдоль y | Профиль<br>вдоль x | Перекрестье | Случайное | Круг | Треугол. |
|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|-----------|------|----------|
| <b>Модель<br/>А</b> | 13%                | 9%                 | 7%          | 6%        | 8%   | 16%      |
| <b>Модель<br/>В</b> | 4%                 | 7.5%               | 2%          | 1%        | 2%   | 1%       |
| <b>Модель<br/>С</b> | 16%                | 17%                | 11%         | 7%        | 11%  | 15%      |

### *Заключение*

В данной работе было исследовано влияние системы наблюдения на точность получаемой дисперсионной кривой при пассивном анализе поверхностных волн. Были рассмотрены различные системы расстановки приемников. Результаты исследования показали, что площадные системы наблюдения (случайное распределение, круговая и треугольная системы) обеспечивают более точное определение дисперсионной кривой по сравнению с линейными и имеют ошибку извлечения дисперсионной кривой ниже для всех типов моделей. Наиболее точное определение дисперсионной кривой во всех случаях имеет случайное распределение.

Также было обнаружено, что линейные системы наблюдения и перекрестие неспособны достоверно восстановить дисперсионную кривую в области низких частот, где фундаментальная мода почти не прослеживается.

Таким образом, выбор системы наблюдения имеет значительное влияние на точность определения дисперсионной кривой при пассивном анализе поверхностных волн. Двумерные системы наблюдения, такие как случайное распределение и круговая, могут обеспечить наиболее точное определение дисперсионной кривой, особенно на низких частотах.

### *Благодарности*

Исследование выполнено за счет совместного гранта Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области № 23-27-10042, <https://rscf.ru/project/23-27-10042/>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aki K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1957. – Vol. 35. – P. 415-456.
2. Cheng F. et al. Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations // Geophysics. – 2016. – Vol. 81. – № 5. – P. EN57-EN66.
3. Le Feuvre M., Joubert A., Leparoux D., Cote P. Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike // Journal of Applied Geophysics. – 2015. – Vol. 114. – P. 36-51.
4. Louie J. N. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2001. – Vol. 91. – № 2. – P. 347-364.
5. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports. – 1989. – Vol. 30. – № 1.
6. Park C. B., Miller R. D. Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW) // Journal of environmental & engineering geophysics. – 2008. – Vol. 13. – № 1. – P. 1-11.
7. Park C. et al. Imaging dispersion curves of passive surface waves // SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG, 2004. – C. SEG-2004-1357.
8. Parolai S. Investigation of site response in urban areas by using earthquake data and seismic noise // New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2). – Deutsches geoforschungszentrum gfz, 2012. – P. 1-38.

© *Р. А. Ефремов, А. В. Яблоков, 2024*