

УДК 001.891.573:620.179.18

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБСЛЕДОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2022 г. Д. В. Шмурак¹, *, А. А. Чуркин², И. Н. Лозовский³, Р. А. Жостков⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

²Акционерное общество “Научно-исследовательский центр “Строительство”,
научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований
и подземных сооружений имени Н.М. Герсеванова, Москва, Россия

³Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: shmouraque@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Представлены результаты использования трехмерного численного моделирования для развития методики анализа данных параллельного сейсмического метода. Метод применяется для определения глубины заложения подземных монолитных конструкций, при этом анализ сигналов традиционно проводится во временной области. Предложена методика анализа данных в частотной области, использующая спектральную характеристику падающей продольной волны.

DOI: 10.31857/S0367676522010252

ВВЕДЕНИЕ

Параллельный сейсмический метод (parallel seismic method, ПСМ) представляет собой адаптацию методики вертикального сейсмического профилирования и применяется для определения глубины заложения монолитных подземных железобетонных конструкций (свай, “стен в грунте”, баретт и др.) [1, 2]. Если исследуемая конструкция расположена под массивным ростверком или включена в состав существующего здания, метод может стать единственной возможностью оценки ее длины и работоспособности [3]. Классический подход к интерпретации данных метода заключается в анализе кинематических параметров зарегистрированных сигналов (времена прихода целевых волн и скоростей их распространения). Анализ данных метода в частотной области может расширить возможности метода и повысить достоверность заключений о качестве конструкций.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Для проведения изысканий с применением ПСМ вблизи конструкции бурится скважина, глубина которой превышает предполагаемую отметку подошвы конструкции. Возбуждение сигнала производится с поверхности объекта исследований с применением ударного источника (кувалды, молотка), регистрация — перемещающимся по скважине приемником (гидрофоном) [4]. Точность определения глубины заложения конструкции оценивается в 5% и зависит от шага регистрации данных, параллельности осей скважины и фундамента и других факторов [5].

Анализ сигналов традиционно проводится во временной области — на сейсмограммах выделяется годограф первых вступлений, соответствующий временам прихода падающей продольной волны, по точке излома которого определяется глубина нижнего торца объекта исследований.

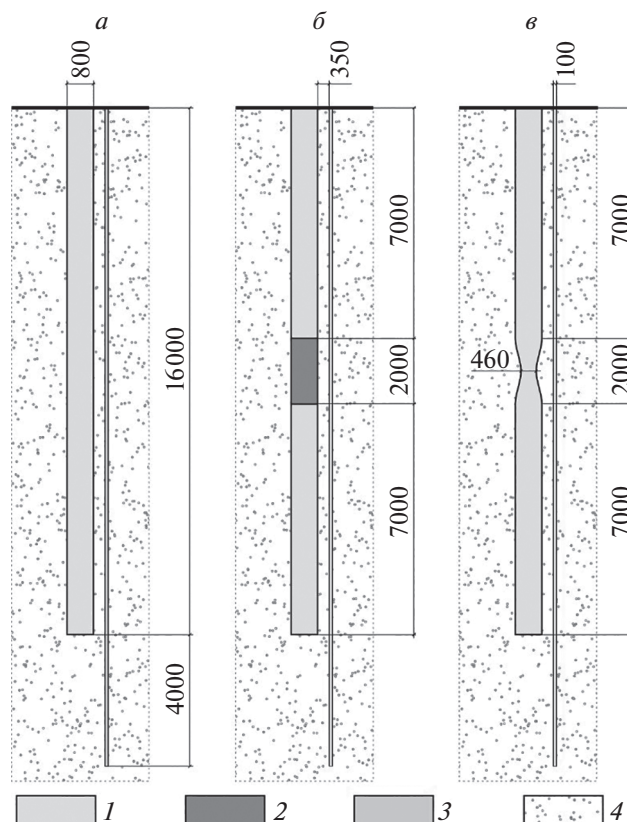


Рис. 1. Схемы численных моделей, имитирующих испытания свай параллельным сейсмическим методом. Модель 1 (а), Модель 2 (б), Модель 3 (в). Обозначения материалов: 1 – бетон; 2 – бетон пониженной прочности; 3 – вода; 4 – песок.

Времена первых вступлений на сейсмограмме FAT определяются выражением:

$$FAT = \frac{S_{str}}{V_{str}} + \frac{S_{soil}}{V_{soil}}, \quad (1)$$

где S_{str} – путь, пройденный волной по конструкции, S_{soil} – путь, пройденный волной в грунте, V_{str} – скорость волны, распространяющейся в материале конструкции, V_{soil} – скорость волны во вмещающем грунте.

Подземные конструкции имеют выраженные волноводные свойства из-за повышенной акустической жесткости бетона по сравнению с вмещающими грунтами. При возбуждении в них упругих колебаний распространяются направленные волны – стержневые в свайных фундаментах и пластинчатые в “стенах в грунте”, фазовая скорость которых отличается от скорости продольной волны V_p [6]:

$$V_p \approx V_{rod} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \approx V_{plate} \sqrt{\frac{(1-\nu)^2}{1-2\nu}}, \quad (2)$$

где V_{rod} – скорость стержневой плоской волны, V_{plate} – скорость пластинчатой плоской волны, ν – коэффициент Пуассона.

Результаты численного моделирования показали возможность выявить ярко выраженные дефекты конструкций (сужения поперечного сечения или снижения прочностных свойств материала) по изменениям волновой картины – появлению гипербола дифракции и “разрывам” в наблюдаемых годографах [4, 7].

Интерес представляет использование динамических характеристик сигналов для повышения информативности данных метода. Классический подход к интерпретации, подразумевающий изучение годографа первых вступлений, может быть дополнен анализом атрибутов (представляющих собой динамические характеристики сигнала или рассчитываемые из них с применением различных преобразований параметры).

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПСМ

Предлагаемый в статье подход к работе с данными ПСМ заключается в анализе спектральной

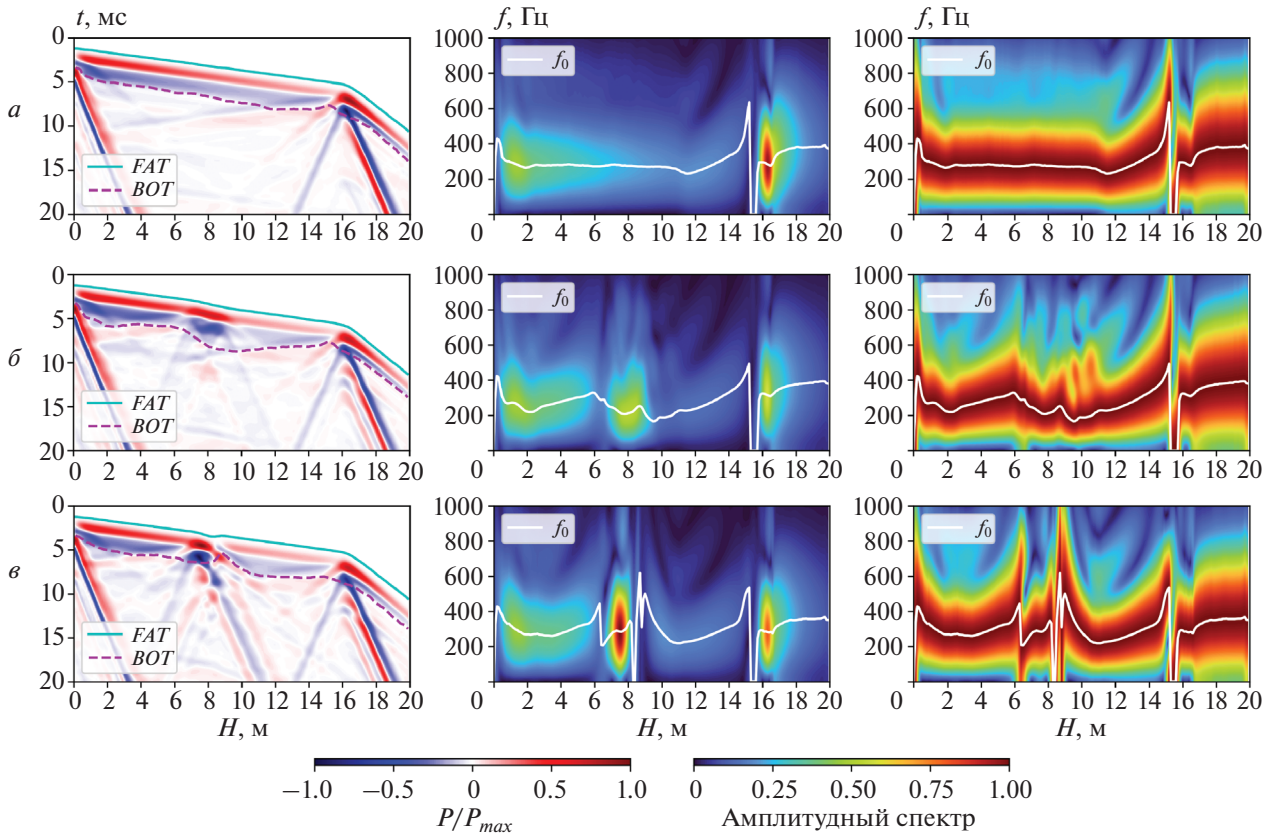


Рис. 2. Результаты трехмерного численного моделирования. Модель 1 (а), Модель 2 (б), Модель 3 (в). Слева – данные во временной области (нормированы на максимальное значение давления P_{max} из всего ансамбля данных). По центру – спектральные разрезы (нормированы на максимальное значение из всего ансамбля данных). Справа – спектральные разрезы (нормированы на максимальное значение из каждого отдельного спектра). *FAT* – отметки первого вступления сигнала; *BOT* – нижняя граница временного окна для расчета спектров и атрибутов; f_0 – центральная частота сигнала.

характеристики падающей продольной волны. Для каждого зарегистрированного сигнала определяется целевой годограф и подбирается временное окно для расчета амплитудного спектра, включающее в себя полный период импульса. Полученные таким образом наборы спектров сортируются в зависимости от глубины точки регистрации сигнала и представляются в виде спектральных разрезов с нормировкой как по максимальному значению всего ансамбля данных, так и по максимальному значению каждого отдельного спектра (см. ниже на рис. 2).

Для каждого зарегистрированного сигнала в пределах указанного временного окна предлагается рассчитывать атрибут центральной частоты f_0 (частоты, соответствующей максимальному значению амплитудного спектра) и представленные в работе [8] параметры: энергию сигнала E_n и площадь спектра S_n . Все три показателя связаны с характером поглощения акустического сигнала и интерференцией волн, распространяющихся в конструкции и вмещающих грунтах.

ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования спектрального подхода к анализу данных ПСМ выполнено трехмерное численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.3 (лицензия № 9600341) [9]. Геометрические размеры конструкций, граничные условия и физические свойства моделируемых материалов (табл. 1) соответствуют распространенным на практике случаям. При численных расчетах использована сетка конечных элементов, содержащая призматические и тетраэдральные элементы. Выбранный временной шаг обеспечивает сходимость решения при ошибке расчетов, не превышающей 0.5%.

Оптимизация сетки конечных элементов с поиском конфигурации, состоящей из минимального числа элементов, обеспечивающих заданную сходимость решения, не проводилась ввиду малого числа реализаций. Число конечных элементов составило порядка 425 тысяч, общее количество временных шагов (с учетом условия Ку-

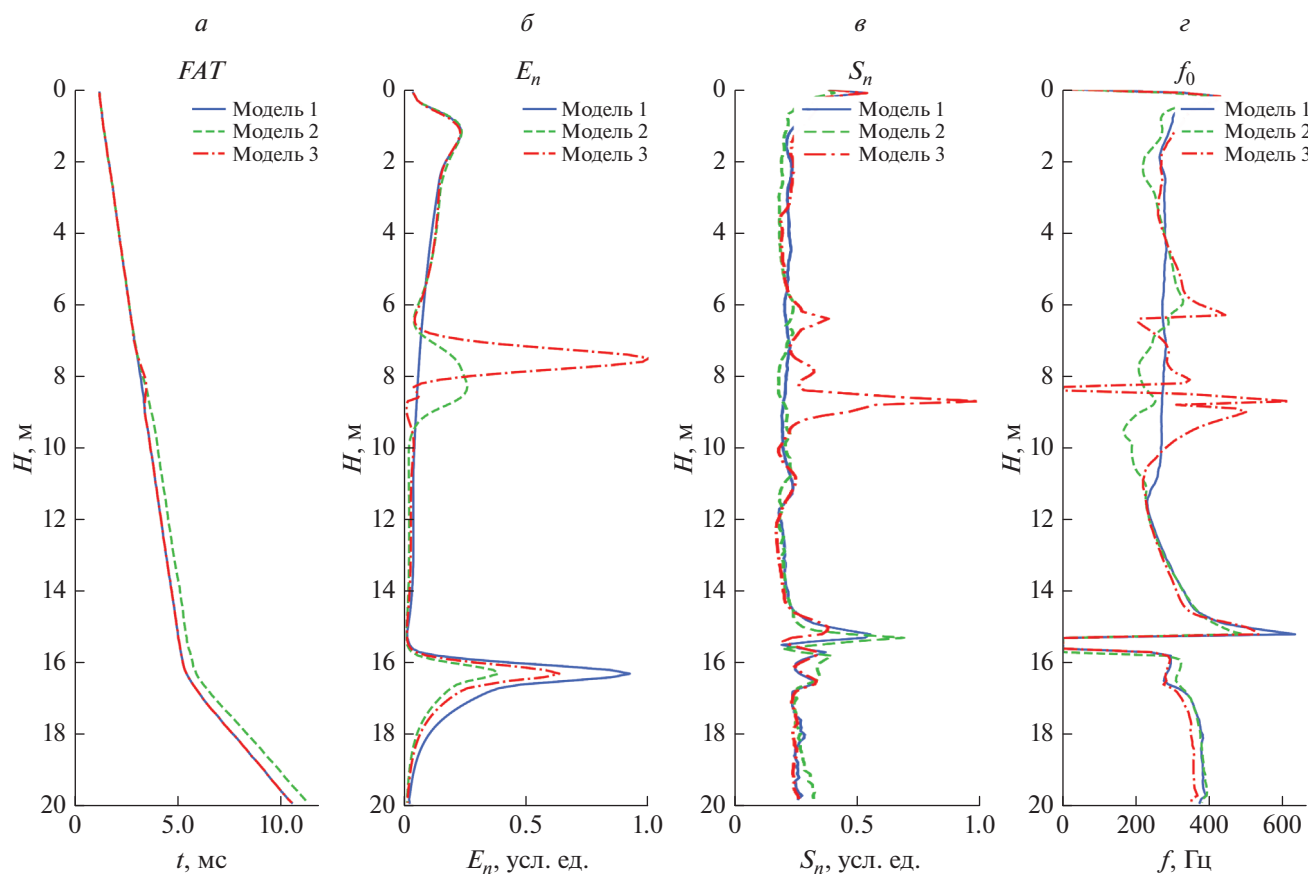


Рис. 3. Графики изменения атрибутов сигналов в зависимости от глубины регистрации данных. FAT (а), E_n (б), S_n (в), f_0 (г).

ранта–Фридрихса–Леви) составило около 4000. Длительность расчета одной реализации применения метода ПСМ с помощью рабочей станции на базе двух 12-ядерных процессоров Хеон составила чуть более 14 ч с применением прямого решателя.

Модель 1 представляет собой бетонную сваю длиной 16 м и диаметром 800 мм с ненарушенной сплошностью, изготовленную в песках (рис. 1а). На расстоянии 350 мм от сваи расположена скважина глубиной 20 м и диаметром 100 мм, заполненная водой. Регистрация сигнала

Таблица 1. Свойства материалов

Материал	Бетон	Бетон пониженной прочности	Песок	Вода
Плотность (ρ), кг/м ³	2400	1900	1500	1000
Скорость продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, м/с	4000; 2450	2500; 1550	600; 200	1500; –
Рэлеевская модель затухания. Коэффициенты α , с ⁻¹ ; β , с	20; 10 ⁻⁸	100; 5 · 10 ⁻⁷	200; 10 ⁻⁷	–
Коэффициенты динамической и объемной вязкости, мПа · с	–	–	–	1; 3

ла производится точечными гидрофонами, регулярно расположенными в скважине с шагом 100 мм. Из-за симметрии модели не было необходимости проводить численный расчет для всей модели, вместо чего рассматривалась только ее половина с использованием специального граничного условия.

Источник упругих волн расположен на поверхности оголовка сваи и задавался граничным условием в виде равномерно распределенной силы на участке диаметром 8 см. Временная зависимость приложенной горизонтально вниз силы описывается однополярным гауссовым импульсом, модулированным окном Ханнинга.

Для иллюстрации влияния дефектов ствола сваи на данные составлены Модель 2 с включением в тело сваи слоя бетона пониженной прочности (рис. 1б) и Модель 3 с сужением поперечного сечения сваи до 460 мм (рис. 1в). Дефекты расположены в центральной части сваи и имеют мощность 2 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты численного моделирования позволяют сделать ряд наблюдений о том, как нижний торец сваи и различные типы дефектов проявляются на спектральных разрезах (рис. 2) и количественно влияют на значения атрибутов.

На синтетических данных, рассчитанных для Модели 1, длина сваи определяется с высокой точностью как по точке перелома годографа, так и по изменению частотного состава импульса (рис. 2а), вызванного интерференцией первичных волн, и вторичных, образованных у нижнего торца конструкции.

Сравнение годографов падающей продольной волны с графиками изменения атрибутов наглядно демонстрирует преимущества использования динамических параметров сигнала для получения дополнительной информации о состоянии фундамента (рис. 3). Нижний торец сваи и дефекты проявляются в виде ярких аномалий на спектральных разрезах, нормированных по максимальному значению амплитуды всего ансамбля данных (с такой нормировкой амплитудный спектр сильно зависит от амплитуды сигнала), а также на графике атрибута энергии (рис. 3б). Дефекты проявляются в частотной области как на спектральных разрезах (рис. 2), так и на графиках зависимости центральной частоты и площади спектра от глубины (рис. 3в и 3г).

Стоит отметить, что дефект в Модели 2 (бетон пониженной прочности) и дефект в Модели 3 (сужение ствола сваи) проявляются по-разному.

На спектральном разрезе по данным Модели 2 наблюдаются “флуктуации” спектра, а на разрезе для Модели 3 наблюдаются “всплески” с резко возрастающей центральной частотой сигнала, обусловленные интерференцией сигнала с вторичными волнами, образовавшимися вокруг границ сужения сечения сваи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в статье подход к спектральному анализу сигналов позволяет расширить возможности параллельного сейсмического метода и повысить надежность заключений о качестве конструкций. На примере данных численного моделирования показана возможность выделения нижнего торца свай и дефектов двух типов по изменению динамических характеристик сигналов. Предложен набор атрибутов (центральная частота, энергия сигнала и площадь спектра), позволяющих характеризовать изменение формы или материала конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hurtado J.* // Rev. Francaise de Geotechnique. 1979. No. 6. P. 65.
2. *Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В.* // Геотехника. 2018. № 5–6. С. 62.
3. *Hossain M.S., Khan M.S., Hossain J. et al.* // J. Perform. Constr. Facil. 2013. V. 27. No. 2. P. 209.
4. *Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Жостков Р.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 1. С. 124.
5. *Niederleithinger E.* // Proc. Stresswave 2008. (Lisbon. 2008). P. 315.
6. *Капустин В.В., Владов М.Л.* // Геотехника. 2020. № 4. С. 72.
7. *Zhi Tang Lu, Zhi Liang Wang, Dong Jia Liu* // Soil Dyn. Earthq. Eng. 2013. No. 55. P. 255.
8. *Чуркин А.А.* Развитие методики применения геофизического комплекса для контроля качества заглубленных монолитных конструкций. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 162 с.
9. *Жостков Р.А.* Программа для моделирования исследования буронабивных свай поверхностным сейсмоакустическим методом. ПО № 2019665449.

Spectral analysis of parallel seismic method data for surveying underground structures

D. V. Shmurak^{a,*}, A. A. Churkin^b, I. N. Lozovsky^c, R. A. Zhostkov^d

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b *JSC Research Center "Stroitelstvo", Gersevanov Research Institute of Bases and Under-ground Structures, Moscow, 109428 Russia*

^c *Geoelectromagnetic Research Center, Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

^d *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

**e-mail: shmouaque@gmail.com*

The results of three-dimensional numerical simulation of parallel seismic method for deep foundations testing are presented. The method is used to determine the depth of the monolithic reinforced concrete structures. The signal analysis is usually carried out in the time domain. A technique for data analysis in the frequency domain is proposed with the use of the spectral characteristics of incident longitudinal wave.