

А. В. Яблоков^{1,2,3}, П. А. Дергач^{1,3}, А. В. Лисейкин⁴*

Обработка записей микросейсмических колебаний методом Накамуры на территории Быстровского вибросейсмического полигона

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

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

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁴Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН», г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: yablokovav@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию метода Накамуры (HVSР) путём его апробации при обработке трехкомпонентных записей микросейсм, зарегистрированных на Быстровском вибросейсмическом полигоне в Новосибирской области. Стандартный граф обработки методом HVSР был модифицирован для повышения надежности определения пика отношения амплитудного спектра вертикальной и горизонтальной компоненты микросейсм. В результате анализа зарегистрированных данных построена карта распределения резонансной частоты верхнего неконсолидированного слоя толщи. По значениям резонансной частоты и скорости поперечной волны рассчитана глубина подошвы верхнего слоя суглинков, залегающих на слое высокоскоростных глинистых сланцах. Выявлена высокая корреляция значений глубин верхнего слоя, рассчитанных с помощью метода HVSР, метода преломленных волн и многоканального анализа поверхностных волн. Сделан вывод, что метод HVSР дает возможность надежного определения подошвы залегания грунтов при высоком контрасте сейсмических жесткостей слоёв грунта и коренных пород.

Ключевые слова: микросейсм, метод Накамуры, метод преломленных волн, метод многоканального анализа поверхностных волн

A. V. Yablokov^{1,2,3,}, P. A. Dergach^{1,3}, A. V. Liseikin⁴*

Processing of microseismic records using the Nakamura method on the Bystrov vibroseismic landfill

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴Seismological Branch of Federal Research Center «Geophysical Survey of RAS», Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: yablokovav@ipgg.sbras.ru

Abstract. This study is devoted to the Nakamura method (HVSР) by testing it in the processing of three-component records of microseisms recorded at the Bystrov vibroseismic landfill in the Novosibirsk region. The standard processing graph of the HVSР method was modified to increase the reliability of determining the maximum value of the amplitude spectrum ratio of the vertical and horizontal components of microseisms. As a result of the analysis of the recorded data, a resonance fre-

quency distribution map of the upper unconsolidated layer of the thickness was constructed. Based on the values of the resonance frequency, the depth of the bottom of the upper layer of loam overlain by a layer of high velocity clay shales was calculated. A high correlation of the values of topsoil depths calculated using the HVSR method, the refracted-wave method, and multichannel analysis of surface waves was revealed. It is concluded that the HVSR method makes it possible to reliably determine the bedrock basement at high contrast of seismic stiffnesses of soil and bedrock layers.

Keywords: microseisms, Nakamura method, refracted wave method, multi-channel analysis of surface waves

Введение

Метод Накамуры (QTS, или HVSR, или H/V метод) используется для оценки резонансной частоты и усиления колебаний неконсолидированного грунта, перекрывающего более высокоскоростные отложения или коренные породы. Метод HVSR получил широкое распространение как часть сейсмического микрорайонирования за счёт того, что относительно простая обработка трёхкомпонентной записи длительностью от нескольких десятков минут до одного часа обеспечивает надежное определение резонансных частот грунта [1]. Метод основан на вычислении отношения сглаженных амплитудных спектров горизонтальной и вертикальной компоненты (H/V-кривая) микросейсмических колебаний или записей землетрясений [2]. Амплитудные пики рассчитанных H/V-кривых являются диагностическим признаком наличия высоких контрастов сейсмических жёсткостей, а их вариативность по форме и расположению на частотной оси свидетельствует о латеральной неоднородности толщи [3].

Наибольшие ограничения метода заключаются в отсутствии глобальной стандартизации способа расчета и интерпретации HV-кривой, т.к. волновое поле микросейсм зависит от локальных особенностей исследуемой площадки и может состоять из объемных SH-волн [2], поверхностных волн Релея [4] и Лява [5] или диффузных волн и/или их комбинации [6]. По этой причине пока не существует аналитического выражения для расчета HV-кривой, приближенной к реальной. Тем не менее, в некоторых случаях на практике удается обращать пик HV-кривой путём расчета кривой эллиптичности поверхностной волны Релея и восстанавливать одномерные глубинные модели скорости поперечной волны [7, 8]. Неоднозначность рассчитанных скоростных моделей уменьшается путём совместной инверсии с дисперсионными кривыми [9] и ограничения границ поиска восстанавливаемых параметров скоростной модели (обычно скорость поперечной волны и мощность слоёв) за счёт результатов других методов (МПВ, MASW) или привлечения априорной информации (скважинные данные). Точное обращение HV-кривой требует полного знания не только временного и пространственного распределения источников, но их параметры: тип, направленность и энергия.

Быстровский вибросейсмический полигон с изученным геологическим строением является практически эталонным объектом для исследования метода HVSR: верхний слой (с глубиной до 15 м) переслаивания песка и суглинков, перекрывает толщу глинистых сланцев, при этом достигается контраст сейсмических жёсткостей более чем в 5 раз. С трёх сторон полигон омывается водами Об-

ского водохранилища, приливные волны которого генерируют необходимый низкочастотный шум.

В настоящей работе выполняется анализ микросейсмических данных, зарегистрированных на территории полигона в рамках исследовательских работ Сейсмологического филиала «Единой геофизической службы СО РАН». В работе сопоставляется граф стандартной и модифицированной обработки методом HVSR. В результате анализа данных строится карта распределения резонансной частоты слоя грунтов. Также вдоль линейного профиля рассчитывается глубина подошвы верхнего слоя, которая сопоставляется с результатами обработки данных методом преломленных волн и многоканального анализа поверхностных волн.

Описание методики сбора и предобработки полевых данных

На территории Быстровского полигона в 2014 г Единая геофизическая служба (ЕГС) СО РАН выполняла исследовательские работы по активному вибросейсмическому мониторингу с помощью многотонных вибраторов. В работе используются данные микросейсм, непрерывно зарегистрированные с 8 по 9 июля 2014 г. Расположение сейсмических станций на местности показано на рисунке 1 желтым цветом. Частота дискретизации записи – 500 Гц, общее количество станций, подлежащих обработке – 44. Сейсмические колебания регистрировались трехкомпонентными сейсмоприемниками GS-ONE с собственной частотой колебаний 10 Гц. К записи 10-герцового датчика была применена процедура низкочастотной деконволюции [10], позволившая расширить его диапазон в низкочастотную область с 10 до 1 Гц. На рисунке 1 синим кругом изображен 40-тонный вибратор, работающий по расписанию. Диапазоны частот зондирования 7.91 – 11.35 Гц и время работы вибратора до 60 мин [11].

В период 8-11 сентября 2015 г на полигоне сотрудниками ЕГС СО РАН также выполнялись сейсморазведочные работы по системе наблюдений метода преломленных волн (МПВ), изображенной красным цветом на рисунке 1. Система наблюдений МПВ состоит из 9-ти 100-метровых линейных профилей с шагом между пунктами приема (ПП) 5 м, между пунктами возбуждения (ПВ) – 25 м. Для записи сейсмограмм использовалась группа из 3х вертикальных сейсмоприёмников «GS-20DX» с частотой дискретизации 500 Гц. Источник сейсмических волн – удар гирей массой 32 кг по металлической пластине диаметром ~15 см.

Поскольку данные, записанные при работающей вибрационной установке, не подлежат обработке методом HVSR выполняется предварительная фильтрация. На первом этапе обнуляются амплитуды по пороговому значению. Для этого рассчитывается среднеквадратическое отклонение (σ) в скользящем окне длительностью 60 с. Временное окно для обнуления амплитуд записи определяется по превышению значения $2 \cdot \text{median}(\sigma)$.

Следующим этапом предобработки исключаются высокоамплитудные локальные всплески, т.к. имеют случайную или антропогенную природу и не относятся к микросейсмам. Для поиска локальных максимумов амплитуд применя-

ется метод STA/LTA с коротким окном 0.5 с, длинным окном 30 с и пороговым значением отношения максимальных амплитуд в окнах равным 5. Окно обнуления длиной 30 с центрируется по индексу найденного амплитудного всплеска. Так, например, для станции «26», расположенной в юго-западной части полигона максимальная амплитуда уменьшается с $2 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^4$ после первого этапа фильтрации и до $5 \cdot 10^3$ после второго. При этом среднеквадратическое отклонение уменьшается с исходного $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^2$ после всех фильтраций. Пример отфильтрованной трехкомпонентной записи для станции «26» изображен на рисунке 2.



Рис. 1. Спутниковая карта Быстровского полигона с отмеченными на ней сейсмическими станциями (желтым цветом), вибрационной установкой (синим цветом) и профилей МПВ (красным цветом).

Описание алгоритма обработки методом HVSR

Стандартный граф обработки методом HVSR состоит из следующих основных этапов [1]:

- Трехкомпонентная запись микросейсм разбивается на серию окон равной длины. Обычно длина окна составляет от 20 до 120 с.
- Для каждого окна рассчитываются и сглаживаются одномерные амплитудные спектры Фурье. Для сглаживания спектров используется алгоритм Конно-Омачи.
- Вычисляется отношение между спектрами горизонтальной и вертикальной компонентой для каждого окна. На первой итерации рекомендуется использовать попеременно каждый из спектров двух ортогональных горизонтальных компонент. В случае их схожести (диапазон определения частоты максимума не

превышает 10%), используется среднее (арифметическое, геометрическое, квадратическое и др.) значение спектров горизонтальных компонент, иначе дальнейший анализ следует проводить отдельно с каждой компонентой.

- Итоговая HV-кривая определяется как медианная кривая среди кривых, рассчитанных для каждого окна.

Описанный выше граф обработки в незначительной модификации реализован во многих открытых программных пакетах, таких как Geopsy, hvsrpy, HVSRweb и др., использующихся исследователями по всему миру.

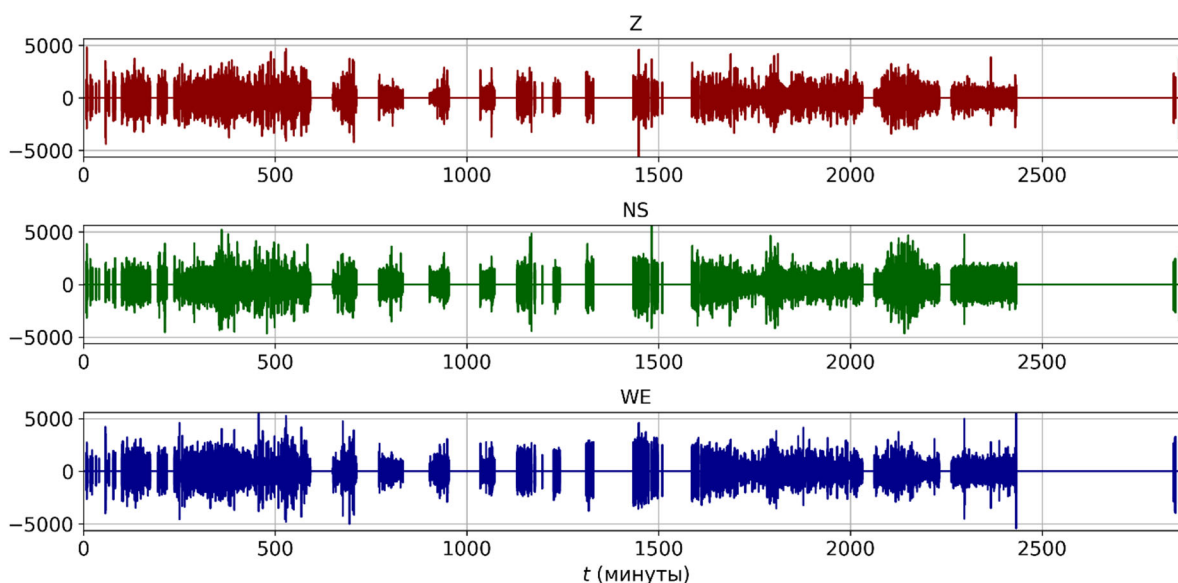


Рис. 2. Графики записи микросейсм для станции «26» после фильтрации во временной области. Условные обозначения: Z – вертикальная компонента записи, NS и WE – горизонтальные компоненты записи, ориентированные в направлении север-юг и запад-восток соответственно.

Предлагается анализировать спектр микросейсм с точки зрения обработки стоячих волн и производить суммирование квадратов амплитудных спектров, рассчитанных для каждого временного окна записи. Предполагается что регулярный сигнал в этом случае будет накапливаться быстрее чем случайный шум. Возведение в квадрат амплитудного спектра обеспечит более резкий основной пик на фоне остальных. Результат применения модифицированного графа обработка для записи станции «26» представлен на рисунке 3. Интерпретация рассчитанной кривой должна проводится совместно с анализом амплитудных спектров. Так, амплитудный пик, проявляющийся на одной и тоже частоте на всех спектрах относится к аппаратурной наводке. На частотах в окрестности максимума HV-кривой, относящегося к естественным грунтовым условиям, проявляется «глазная» форма амплитудных спектров Фурье: спектр горизонтальной компоненты имеет значительно большее значение, чем спектр вертикальной компоненты. Такая форма спектров проявляется в диапазонах 3.5-6 Гц на всех зарегистрированных записях.

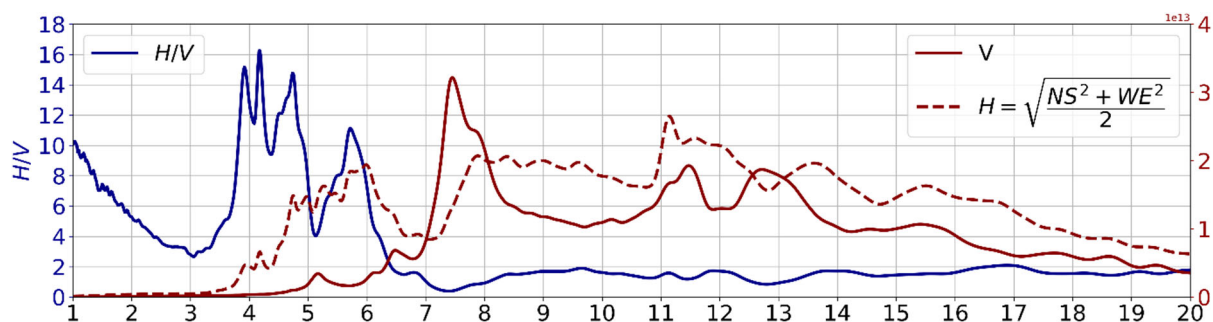


Рис. 3. Графики суммированных амплитудных спектров и их отношение (HV-кривая), рассчитанные для данных станции «26».

Результат обработки данных

Основной результат анализа HV-кривых – частота их максимума, которая интерпретируется как основная мода резонансной частоты SH-волны (f_0) при условии высокого контраста сейсмических жесткостей. В случае однородного упругого слоя со скоростью поперечной волны V_S и мощностью h , залегающего на однородном полупространстве, выражение для определения резонансных частот SH-волны (f_n) записывается следующим образом:

$$f_n = (2n + 1) V_S / 4h, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Значение максимума HV-кривой и его частота проверяется по ряду критериев надежности, предложенных в проекте SESAME [12]. В результате обработки записей всех сеймостанций построена карта распределения резонансной частоты (рис. 4). Все значения частот удовлетворяют принятым критериям. При рассмотрении карты заметно плавное увеличение резонансной частоты с ЮЗ на СВ, из центра на ЮВ и из центра на СЗ по мере приближения к берегу Обского водохранилища. Резкое повышение частоты в районе станций 47-49 может иметь антропогенную природу, т.к. в этой части полигона располагается вибрационная установка и необходимая для нее инфраструктура. Для таких записей необходимо выполнять фильтрацию с меньшим пороговым значением или исключать их при анализе результатов.

С использованием выражения для резонансных частот и значений f_0 была рассчитана глубина границы слоя грунтов вдоль всех профилей МПВ. Используемые для расчета значения V_S определялись с помощью метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW). Метод MASW применяется построения 1D моделей V_S в результате обработки данных, зарегистрированных с использованием вертикальных сейсмоприёмников и системы наблюдений МПВ [13]. На рисунке 5 сопоставляются глубины границы слоя грунтов, рассчитанные методами МПВ (красная кривая), MASW (синяя кривая) и HVSR (зеленая кривая). Заметна высокая корреляция значений глубин верхнего слоя, рассчитанных различными методами.

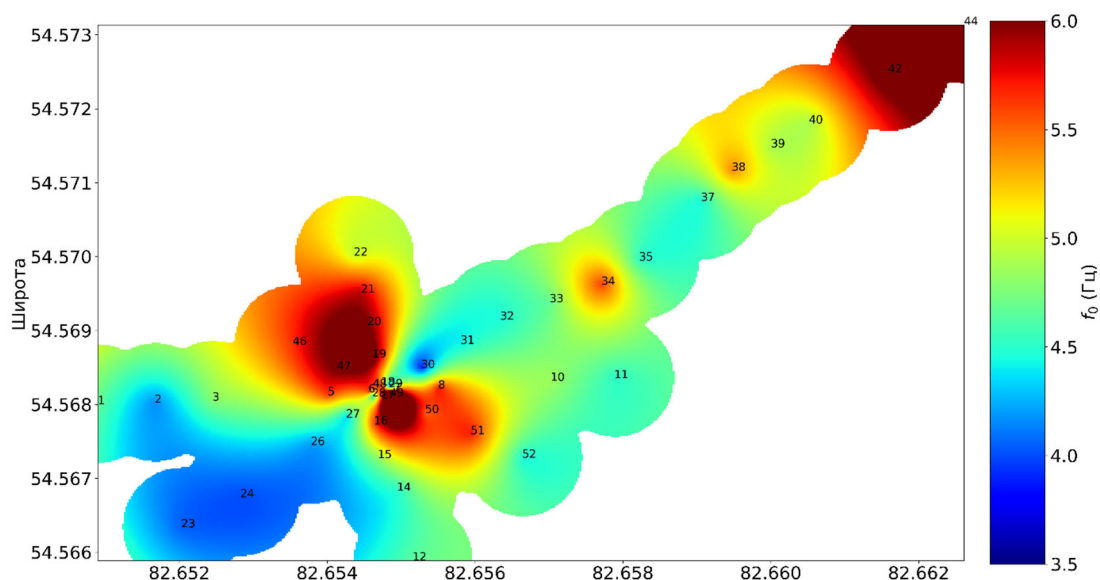


Рис. 4. Карта распределения резонансной частоты, рассчитанной по методу HVSR для микросейсмических данных Быстровского полигона.

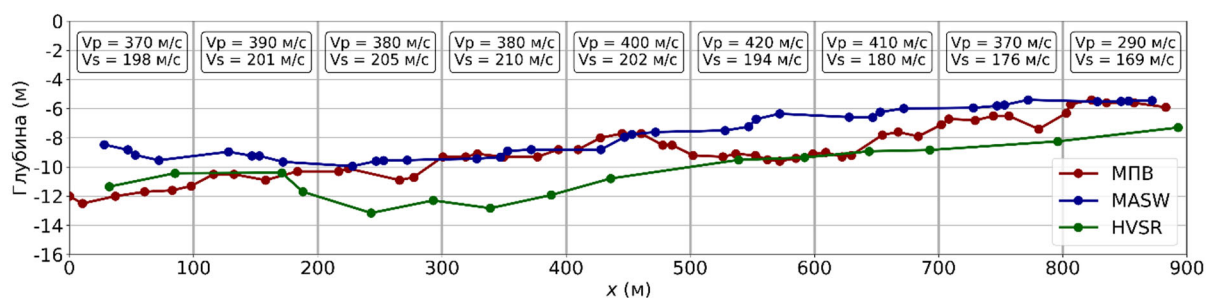


Рис. 5. Графики изменения глубины границы первого слоя от расстояния, рассчитанной методами МПВ, MASW и HVSR. На рисунке также нанесены значения скоростей продольной (V_P) и поперечной (V_S) волны в первом слое, рассчитанные методами МПВ и MASW соответственно.

Заключение

В процессе исследования выполняется апробация метода HVSR с использованием модифицированного графа обработки с целью определения его применимости. В результате анализа данных строится карта распределения резонансной частоты и график мощности верхнего слоя грунтов, который коррелирует со значениями, рассчитанными с помощью методов МПВ и MASW. Из анализа полученных результатов, следует вывод, что метод HVSR дает возможность надежного определения подошвы залегания грунтов при высоком контрасте сейсмических жесткостей слоёв грунта и коренных пород.

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. Application of microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) analysis for site characterization: State of the art / S. Molnar et al. // *Surveys in Geophysics*. – 2018. – V. 39. – P. 613-631.
2. Nakamura Y. What is the Nakamura method? // *Seismological Research Letters*. – 2019. – V. 90. – №. 4. – P. 1437-1443.
3. A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method / S. Molnar et al. // *Journal of Seismology*. – 2022. – V. 26. – №. 4. – P. 653-685.
4. Tuan T., Scherbaum F., Malischewsky P. On the relationship of peaks and troughs of the ellipticity (H/V) of Rayleigh waves and the transmission response of single layer over half-space models // *Geophysical Journal International*. – 2011. – V. 184. – №. 2. – P. 793-800.
5. Van Der Baan M. The origin of SH-wave resonance frequencies in sedimentary layers // *Geophysical Journal International*. – 2009. – V. 178. – №. 3. – P. 1587-1596.
6. A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium / J. Francisco et al. // *Geophysical Journal International*. – 2011. – V. 186. – №. 1. – P. 221-225.
7. The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA) / J. Piña-Flores et al. // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 208. – №. 1. – P. 577-588.
8. Seismic site classification from HVSR data using the Rayleigh wave ellipticity inversion: A case study in Singapore / S. Abdialim et al. // *Earthquakes and Structures*. – 2021. – V. 21. – №. 3. – P. 231-8.
9. Mode misidentification in Rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure / J. Boaga et al. // *Geophysics*. – 2013. – V. 78. – №. 4. – P. EN17-EN28.
10. Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms / P.A. Dergach et al. // *Seismic Instruments*. – 2019. – V. 55. – №. 3. – P. 345-352.
11. Активная сейсмология и ГСЗ с мощными вибраторами в Сибири / В.С. Селезнев и др. // Труды Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика". – 2018. – С. 349-356.
12. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation / C. Acerra et al. // European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME. – 2004.
13. Yablokov A., Lugovtsova Y., Serdyukov A. Uncertainty quantification of multimodal surface wave inversion using artificial neural networks // *Geophysics*. – 2023. – V. 88. – №. 2. – P. KS1-KS11.

© А. В. Яблоков, П. А. Дергач, А. В. Лисейкин, 2023