

Метод пассивной томографической реконструкции глубинных неоднородностей морского дна

Д. А. Преснов^{1,*}, А. Л. Собисевич^{1,†}, А. С. Шуруп^{1,2,‡}

¹Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН

Россия, 123242 Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 04.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Для изучения глубинного строения земной коры, которая является в значительной степени неоднородной, эффективными и все более популярными оказываются методы, использующие в своей основе упругие поверхностные волны. На сегодняшний день существует целый ряд подобных методов, разработанных изначально для применения на суше. В настоящей работе обсуждается алгоритм томографического восстановления скоростного строения геологической среды применительно к морскому дну. В качестве исходных данных в этом случае используются времена пробега поверхностных волн вдоль границы раздела упругой и жидкой сред. Развиваемый метод строится на анализе шумовых данных, регистрируемых сетью донных измерительных станций. Обсуждается возможность оценки функции Грина путем вычисления взаимно-корреляционной функции сейсмоакустического шума. Методика построения карты скоростей основывается на разложении неоднородности скорости по так называемому полосчатому базису, изначально разработанному для задач акустики океана. В результате становится возможным восстановление трехмерного распределения упругих параметров морского дна. В работе представлены результаты выполненной обработки экспериментальных данных на примере эксперимента “Plume lithosphere undersea melt” по изучению строения гавайского плюма.

PACS: 43.30.Ma

УДК: 550.348.432, 550.344.57

Ключевые слова: томография, естественный шум, дисперсия, инверсия, донные сейсмостанции, поверхностные волны Стоунли, магматический плюм.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение неоднородных геологических образований в морском дне является на сегодняшний день востребованной задачей в первую очередь благодаря развитию промышленных технологий добычи полезных ископаемых в морских условиях. К таким образованиям относятся месторождения нефти и газа, но океан богат и другими ресурсами, например, золотом, железной рудой, оловом и т. д. Наиболее популярным геофизическим методом, применяемым на этапе разведки перспективного участка, является морская сейсморазведка, основанная на методе отраженных волн [1]. Главным недостатком этого метода является необходимость использования мощного источника сейсмоакустического сигнала, даже при работе в мелком море на шельфе, что оказывает негативное воздействие на обитателей океана. С точки зрения изучения геологических процессов на Земле большое значение представляют так же скрытые от человеческих глаз океанические хребты, глубоководные желоба, и так называемые горячие точки — места в которых океаническая кора прожигается мантийным потоком. Эффективным методом изучения верхней мантии и материковой коры

в последнее десятилетие стала поверхностно-волновая томография [2, 3] в основе которой лежит измерение времени прохождения волны сквозь изучаемую среду.

Изначально в качестве источника поверхностных волн использовались землетрясения, положение и периодичность которых мы не можем контролировать, однако в последние годы всё большую популярность приобретает метод пассивной обработки, использующий в качестве полезной информации естественный фоновый шум — микросейсмы. По аналогии с акустикой океана [4] оказывается, что функция взаимной корреляции вертикальной компоненты микросейсмического шума, зарегистрированного разнесенными в пространстве сейсмоприемниками, при достаточном времени накопления, является оценкой функции Грина среды. Таким образом, осуществляя корреляционную обработку микросейсмического шума, представляется возможным реализовать методы поверхностно-волновой томографии глубинных структур, основанные на оценке дисперсионных зависимостей (то есть частотных зависимостей фазовых и групповых скоростей) поверхностных волн.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В отличие от свободной поверхности Земли (упругого полупространства) где шумовое поле сформировано в основном фундаментальной модой поверхностной волны Рэлея и может считаться изотропным при дли-

*E-mail: presnov@physics.msu.ru

†E-mail: alex@ifz.ru

‡E-mail: shurup@physics.msu.ru

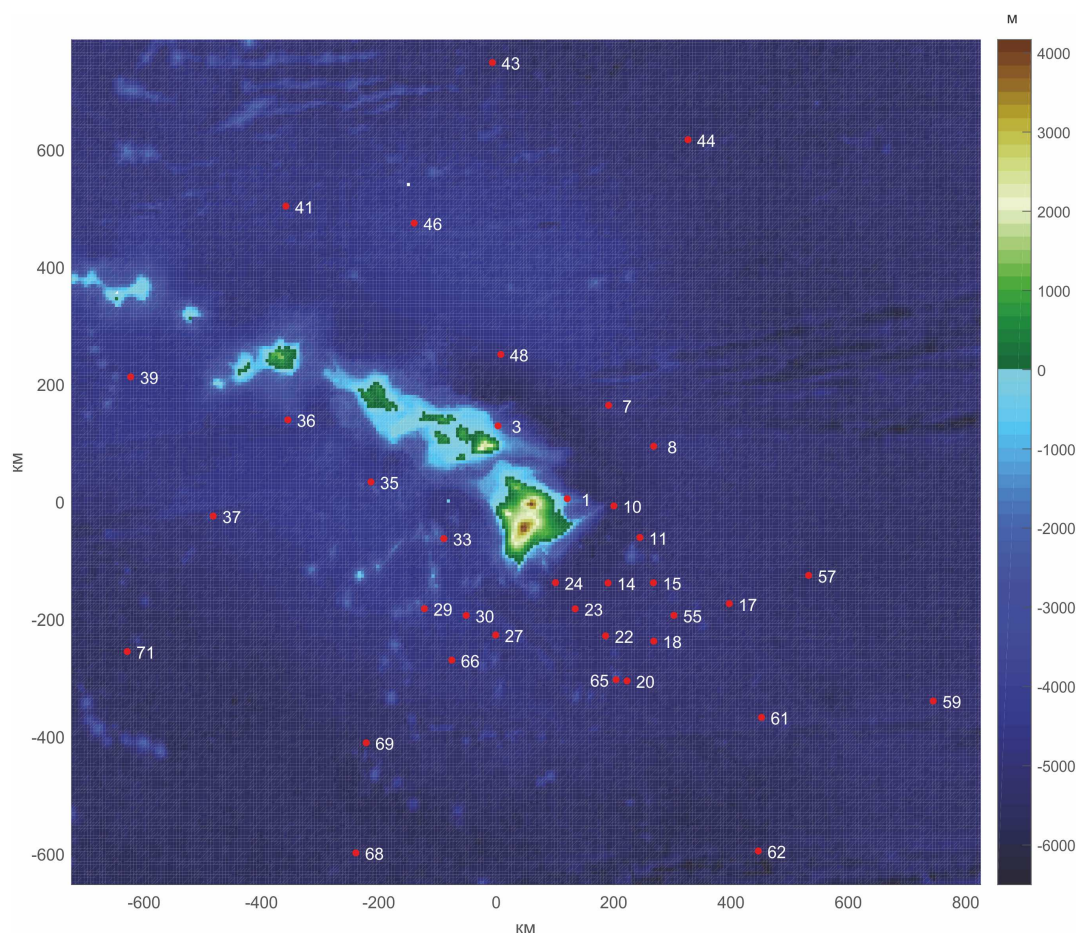


Рис. 1: Распределение сейсмических датчиков на дне океана вблизи о. Гавайи из эксперимента PLUME, данные с которых использовались при томографическом восстановлении

тельном времени накопления, в условиях моря необходимо рассматривать так называемые волны Стоунли (или в зарубежной печати Шолтэ), распространяющиеся вдоль границы упругого и жидкого полупространств [5]. Подводные измерения являются гораздо более зашумленными по сравнению с наземными. Источником этого дополнительного шума являются внутренние и поверхностные гидроакустические волны, а также турбулентное обтекание измерительной станции течением вблизи дна. В связи с этим, представляет интерес экспериментальное исследование возможности выделения полезного для решения задач пассивной поверхностно-волновой томографии микро-сейсмического сигнала на донных сейсмостанциях.

Для апробации рассматриваемого в настоящей работе подхода была использована система, состоящая из 70 широкополосных четырехкомпонентных (три ортогональные компоненты колебательной скорости/ускорения и давление) датчиков эксперимента PLUME в Тихом океане [6] (рис. 1). Гавайские острова имеют вулканическое происхождение, а значит под ними заведомо имеются контрастные области, которые могут стать объектами томографирования.

На первом этапе решалась задача определения времен распространений поверхностных сейсмоакустических волн между каждой из пар станций. Для этого, как было отмечено во введении, вычислялась функция взаимной корреляции для суточных временных рядов по шумовым данным вертикального канала, накопленным за год, и затем полученные результаты усреднялись. Для получения достоверных, симметричных относительно нулевой задержки корреляционных пиков, проводилась предварительная обработка записей, в которую помимо стандартных процедур — учета калибровочной кривой прибора и полосовой фильтрации — входило также удаление записей землетрясений, нормализация амплитуды сигнала и обеление спектра. На данном этапе проводимых исследований удалось оценить времена распространений сигналов между рассматриваемыми приемниками из функции взаимной корреляции шумового сигнала в диапазоне частот 0.05–0.1 Гц (рис. 2). Эти времена пробега являлись исходными данными для построения обсуждаемой в настоящей работе томографической схемы.

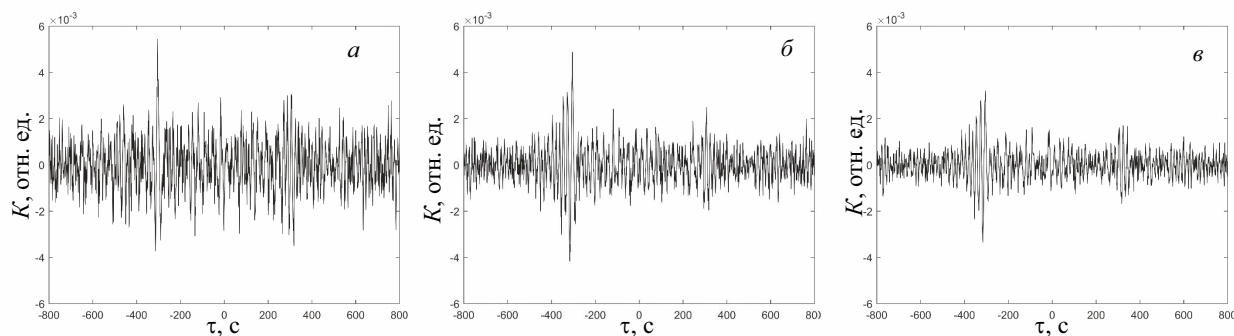


Рис. 2: Пример трансформации взаимно корреляционной функции для одной из пар станций (41–63) в результате накопления шумового сигнала за период: *a* — 1 месяц, *б* — 3 месяца, *в* — полгода

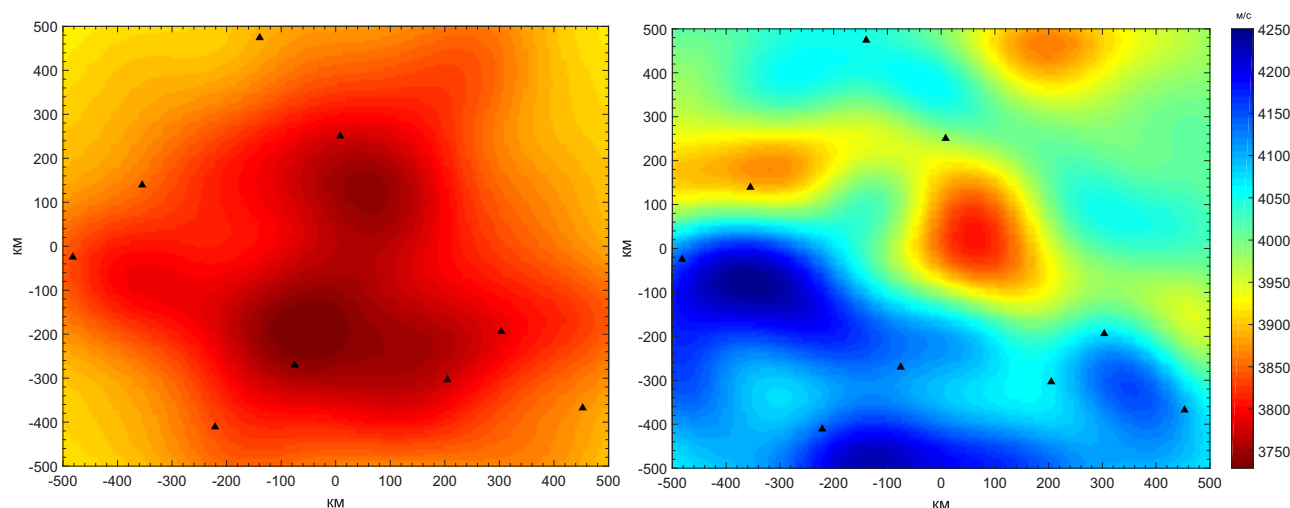


Рис. 3: Результат восстановления распределения скорости поверхностных сейсмоакустических волн в неоднородной среде для частот: *a* — 0.05 Гц — соответствует глубине ~25 км, *б* — 0.1 Гц соответствует глубине ~10 км

2. ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СХЕМА, РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ

В работе используется линейная лучевая томографическая схема восстановления распределения неоднородности скорости поверхностной сейсмоакустической волны $\Delta v(x, y)$ в горизонтальной плоскости на основании экспериментально определенных возмущений времен распространения сигналов Δt_i прошедших через исследуемую область между *i*-ой парой приемников:

$$\Delta t_i \approx - \int_{L_i^0} \frac{\Delta v(x, y) dl^0}{v_0^2(x, y)}, \quad (1)$$

где L_i^0 траектория луча, соединяющего рассматриваемую *i*-ую пару датчиков в невозмущенной среде. Один из способов решения интегральных уравнений (1) основан на их дискретизации. В этом случае восстанавливаемые характеристики среды представляются в виде линейной комбинации конечного числа базисных функций $\Delta v(x, y) = \sum_{j=1}^J x_j \Theta_j(x, y)$. В итоге система уравнений (1) сводится к: $AX = \Delta T$,

где элементы матрицы возмущений A имеют вид $A_{ij} = - \int_{L_i^0} \frac{\Theta_j(x, y)}{v_0^2(x, y)} dl^0$. Столбец ΔT состоит из значений временных задержек сигналов Δt_i , а вектор X — из неизвестных коэффициентов x_j разложения искомой функции $\Delta v(x, y)$ по базису $\Theta_j(x, y)$. В процессе проведения исследований мы использовали МНК-решение, регуляризованное путем добавления к A^+A единичной матрицы с весовым коэффициентом, который контролирует требование минимизации нормы решения по сравнению с нормой невязки. При восстановлении неоднородностей нами используется так называемый полосчатый базис [7], изначально разработанный для решения задач томографии океана [8].

На рис. 3 приведен пример восстановления распределения скорости поверхностных сейсмоакустических волн в горизонтальной плоскости (карта скоростей) для двух различных частот. На рис. 3, как и на рис. 1 треугольниками отмечены приемники, центры обоих рисунков совпадают, отличается лишь масштаб. Теплые цвета соответствуют структурам, скорость рас-

пространения в которых понижена, то есть они интерпретируются как более подвижные/жидкие материалы, связанные с потоком магмы в питающей системе вулкана. Как можно заметить на большой глубине в мантии (рис. 3,а) область пониженных скоростей гораздо больше и интенсивней чем в океанической коре (рис. 3,б), однако и здесь удастся четко локализовать район, в котором магматический плюм выходит на поверхность.

На последнем этапе возможен переход от карт скоростей поверхностных сейсмоакустических волн, дающих качественное представление о параметрах среды на некоторых глубинах, к трехмерному распределению скорости поперечных волн, которая однозначно связана с упругими свойствами среды. Для этого необходимо при помощи карт скоростей, полученных для достаточного количества частот, построить дисперсионные кривые, соответствующие фиксированному узлам на карте. Выполняя инверсию дисперсионных кривых поверхностных волн одним из известных методов (например [9]) можно в каждой точке карты получить глубинное строение среды и в результате восстановить трехмерное изображение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность изучения неоднородных структур морского дна (до 25 км) в глубоком море при помощи приемников сейсмоакустического сигнала, установленных на дне в пассивном режиме. Результаты работы находятся в согласии с оригинальным исследованием [6], где в качестве зондирующего источника рассматривались землетрясения, а не естественный фоновый шум и другими подходами [10], основанными на использовании информации об амплитудных характеристиках поверхностных волн. Дальнейшее развитие исследования связано с поиском возможностей сокращения необходимого времени накопления шумового сигнала, которое на сегодняшний день может достигать одного года.

Экспериментальные данные, использовавшиеся при выполнении настоящего исследования, были получены при помощи оборудования организации OBSIP (<http://www.obsip.org>), которая финансируется Национальным научным фондом. Данные находятся в открытом доступе на сайте центра IRIS (<http://www.iris.edu>).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-02046).

- [1] Гурвич И.И., Номоконов В.П. Сейсморазведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1981.
- [2] Yang Y., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Shapiro N.M. *Geophys. J. Int.* 2007. **168**. P. 259.
- [3] Яновская Т.Б. Физика Земли. 2009. № 3. С. 50. (Yanovskaya T.B. *Izvestiya. Phys. Solid Earth*. 2009. **45**, N 3. P. 225.)
- [4] Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Акустический журнал. 2008. **54**, № 1, С. 51. (Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. *Acoust. Phys.* 2008. **54**, № 1. P. 42.)
- [5] Аконова С.С., Бирюков Е.А., Григорьев А.Г., Тихоцкий С.А., Шур Д.Ю. Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. **43**, № 4. С. 77.
- [6] Laske G., Collins J.A., Wolfe C.J., Solomon S.C., Detrick R.S., Orcutt J.A., Bercovici D., Hauri E.H. *Eos Trans. AGU*. 2009. **90**, № 41. P. 362.
- [7] Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Акуст. журн. 2007. **53**, № 6. С. 791. (Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. *Acoust. Phys.* 2007. **53**, № 6. P. 698.)
- [8] Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Акуст. журн. 2011. **57**, № 3. С. 348. (Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. *Acoust. Phys.* 2011. **57**, № 3. P. 344.) DOI: 10.1134/S1063771011020035)
- [9] Авербах В.С., Грибов Н.Н., Коньков А.И., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Манаков С.А., Таланов В.И. Изв. РАН. Сер. физ. 2016. **80**, № 10. С. 1314. (Averbakh V.S., Konkov A.I., Lebedev A.V., Malekhanov A.I., Manakov S.A., Talanov V.I., Gribov N.N. *Bull. of RAS: Physics*. 2016. **80**. № 10. P. 1185.)
- [10] Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Изв. РАН. Сер. физ. 2017. **81**, № 1. С. 72. (Zhostkov R.A., Presnov D.A., Shurup A.S., Sobisevich A.L. *Bull. of RAS: Physics*. 2017. **81**. № 1. P. 64.)

Method of passive tomographic reconstruction of ocean bottom deep structures

D.A. Presnov^{1,a}, A.L. Sobisevich¹, A.S. Shurup^{1,2}

¹The Shmidt Institute of Physics of the Earth of RAS. Moscow 123995, Russia

²Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
E-mail: ^apresnov@physics.msu.ru

In study of the deep structure of the largely inhomogeneous earth's crust methods based on elastic surface waves are effective and increasingly popular. To date, there are a number of similar methods developed originally for use on land. In this paper, an algorithm is discussed for the tomographic reconstruction of the velocity structure of a geological medium in relation to the seabed. As initial data, in this case the surface wave travel time along the interface between the elastic and liquid media is used.

The developed method is based on the analysis of noise data recorded by a network of bottom measuring stations. The possibility of estimating the Green's function by calculating the correlation function of seismoacoustic noise is discussed. The method of constructing the velocity map is based on the expansion of the velocity inhomogeneity by the so-called banded basis, originally developed for ocean acoustics problems. As a result, it becomes possible to restore the three-dimensional distribution of the elastic parameters of the seabed. Paper presents the results of experimental data processing performed using the «Plume lithosphere undersea melt» experiment to study the structure of the Hawaiian plume.

PACS: 43.30.Ma.

Keywords: tomography, ambient noise, dispersion, inversion, ocean bottom seismograph, Stoneley surface waves, plume.

Received 04 July 2017.

Сведения об авторах

1. Преснов Дмитрий Александрович — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: presnov@physics.msu.ru.
 2. Собищев Алексей Леонидович — доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, зав. лабораторией; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: alex@ifz.ru.
 3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 254-90-80, e-mail: shurup@physics.msu.ru.
-