

Сравнение результатов статистического и дисперсионного подходов в изучении глубинного строения Земли на примере Гавайского плюма

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

¹ФГБУН Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Россия,
123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1

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

Для изучения строения верхней толщи Земли, которая является наиболее неоднородной, эффективными оказываются методы, использующие данные о поверхностных волнах. Существует целый ряд подобных методов, разработанных изначально для применения на суше, среди которых следует выделить метод микросейсмического зондирования (ММЗ) и пассивной поверхностно-волновой томографии (ППВТ). В отличие от других методов глубинного зондирования ММЗ и ППВТ проще в практической реализации, дешевле и могут проводиться с минимальными ограничениями на экологическую сторону эксперимента, поскольку не оказывают пагубного влияния на окружающую среду. Однако ранее эти методы использовались преимущественно на суше. В настоящей работе приводится сравнение этих двух подходов на основе экспериментальных данных, полученных сетью донных сейсмических станций, расположенных в районе Гавайских островов. Результаты микросейсмического зондирования, полученные по данным с донных станций, а также сопоставительный анализ этих результатов с томографическими оценками параметров среды, насколько известно авторам, получены в настоящей работе впервые. Эти результаты указывают на то, что методы глубинного зондирования Земли, основанные на анализе характеристик поверхностных волн, могут приводить к удовлетворительным результатам не только при их применении на суше, но и в морских условиях.

PACS: 93.85.Rt УДК: 53.082.4

Ключевые слова: поверхностно-волновая томография, метод микросейсмического зондирования, плюм, горячая точка.

Для изучения строения верхней толщи Земли, которая является наиболее неоднородной, эффективными оказываются методы, использующие данные о поверхностных волнах [1]. Это объясняется тем, что поверхностные волны, в отличие от объемных, распространяются только в горизонтальных направлениях, что приводит к их более медленному затуханию и, как следствие, преобладанию в сейсмоакустическом сигнале, регистрируемом на поверхности Земли [2]. Во время проведения полевых работ поверхностные волны удается выделить на фоне помехи с высокой точностью, а при обработке допустимо использование не трехмерной, а двумерной томографии, что значительно упрощает расчеты. Информацию о глубинном строении исследуемой области удается получить благодаря тому, что характеристики распространения поверхностных волн определяются в основном параметрами среды, расположенными на глубине, сравнимой с характерной длиной волны, что позволяет осуществить глубинное зондирование при рассмотрении поверхностных волн различных частот.

Методы исследования на основе поверхностных волн (как, впрочем, и остальные сейсмические геофизи-

ческие технологии) по природе зондирующего сигнала можно разделить на две группы: активные и пассивные [14]

Микросейсмический фон формируется совокупностью цугов сейсмических волн, особенности распространения которых хорошо изучены [1, 2]. С другой стороны, он является случайным процессом, поскольку представляет собой суперпозицию большого числа волн различной природы, характеристики которых в отдельности неизвестны. Эта двойственность микросейсм приводит к делению пассивных сейсмических методов еще на две группы, которые согласно [4] можно условно назвать дисперсионными и статистическими.

В настоящей работе приводится сравнение этих двух подходов на примере анализа данных, полученных сетью сейсмических данных Plume Lithosphere Undersea Melt Experiment [5], расположенных в районе Гавайских островов (рис. 1). Отличительной особенностью представляемых результатов является то, что они получены при обработке данных с донных сейсмостанций на основе методов, изначально разработанными для работ на суше.

Согласно современным гипотезам, о Гавайи представляют собой поверхностное проявление мантийного плюма — точечного подъема жидкого материала из нижней мантии Земли. Вулканическая деятельность на протяжении более 75 миллионов лет привела к тому, что цепочка островов и подводных гор протянулось на тысячи километров.

*E-mail: shageraxcom@yandex.ru

†E-mail: presnov@physics.msu.ru

‡E-mail: shurup@physics.msu.ru

§E-mail: alex@ifz.ru

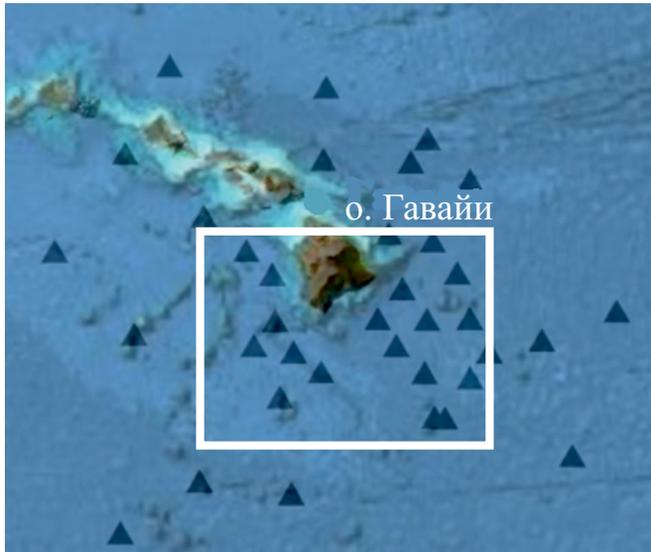


Рис. 1: Расположение сейсмических станций (треугольники) в рамках Plume Lithosphere Undersea Melt Experiment. Белым прямоугольником со сторонами ~ 330 и ~ 380 км показана область, в которой восстанавливалось глубинное строение. В дисперсионном методе использовались все станции рассматриваемого эксперимента, а в статистическом подходе только те, которые попадают внутрь отмеченной области

В качестве статистического метода в данной работе использовался метод микросейсмического зондирования [6]. Согласно этому методу информативным параметром является искажение амплитудного поля при взаимодействии со скоростными неоднородностями. В работе [7] показано, что на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды уменьшаются, а над низкоскоростными — возрастают. Таким образом, метод микросейсмического зондирования сводится к измерению статистически устойчивых спектров микросейсм во всех точках исследуемой территории с последующим построением пространственного распределения амплитуд микросейсм для каждой спектральной частоты f и привязки полученных распределений к соответствующим глубинам H с помощью соотношения $H \approx 0.4V_R(f)/f$ где $V_R(f)$ скорость фундаментальной моды Рэлея. В отличие от стандартных сейсмических технологий в методе микросейсмического зондирования предпочтительными объектами являются субвертикальные, а не субгоризонтальные структуры, поэтому выбранный объект исследования (мантийный плюм) является подходящим.

Результаты восстановления глубинной структуры соответствующей частоте 0.05 Гц по данным станций Plume Lithosphere Undersea Melt Experiment представлены на рис. 2а. Насколько известно авторам, эти результаты являются первыми, полученными по данным с донных сейсмических станций на основе метода микросейсмического зондирования.

Перейдем теперь к дисперсионным методам, кото-

рые, как правило, базируются на измерениях, целью которых является построение экспериментальных кривых зависимостей фазовой скорости поверхностных волн от их частоты. В соответствии с этими методами после расчета дисперсионной кривой проводится процедура ее инверсии с построением карты распределения сейсмических скоростей.

Воспользуемся подходом, предложенным в [8] и развитым в [9]. В соответствии с этой технологией при анализе экспериментальных данных перед процедурой корреляционного анализа проводилось удаление записей землетрясений, нормализация амплитуда сигнала и обеление спектра. Такая обработка проводилась на основе процедур, подробно изложенных в [10, 11]. Полученные результаты восстановления представлены на рис. 2б.

В полученных разными методами результатах (рис. 2) наблюдается различие, связанное с особенностями применявшихся подходов. Так, например, в случае томографических методов разрешающая способность может составлять нескольких длин волн, что приводит к более сглаженным результатам восстановления, в то время как разрешающая способность метода микросейсмического зондирования может достигать одной трети длины волны [12], подчеркивая тем самым более мелкомасштабные детали, не видимые в первом случае. Следует отметить и совпадающие особенности полученных результатов. Так на обоих рисунках присутствуют и низкоскоростная и высокоскоростная неоднородности, причем оба метода дают близкие результаты оценки расположения этих неоднородностей в горизонтальной плоскости.

Следует отметить, что статистический метод требует заметно меньшего времени накопления сигнала, чем томографический подход. Так, результаты, представленные на рис. 2а получены на основе 9 часовых записей микросейсмического шума, в то время как построение рис. 2б потребовало обработки данных, накопленных в течение года. В случае, когда требуется быстрая оценка положения и формы глубинных неоднородных включений, то предпочтительнее использовать метод микросейсмического зондирования, а если необходимы численные оценки скоростных характеристик, то требуется привлечение методов поверхностно-волновой томографии.

Повышение точности получаемых оценок возможно при учете влияния неоднородностей рельефа, приводящих к дополнительному рассеянию поверхностных волн. В рассматриваемых задачах учет влияния рельефа может оказаться необходимым в тех случаях, когда характерный размер неоднородностей рельефа сопоставим с длинами зондирующих волн. В этом случае рельеф оказывает влияние, как на дисперсионные, так и на статистические методы, фокусируя или дефокусируя поверхностные волны, что приводит, например, к изменению пространственного распределения амплитуды поверхностных волн. Учет подобного влияния может быть осуществлен при помощи пространственного

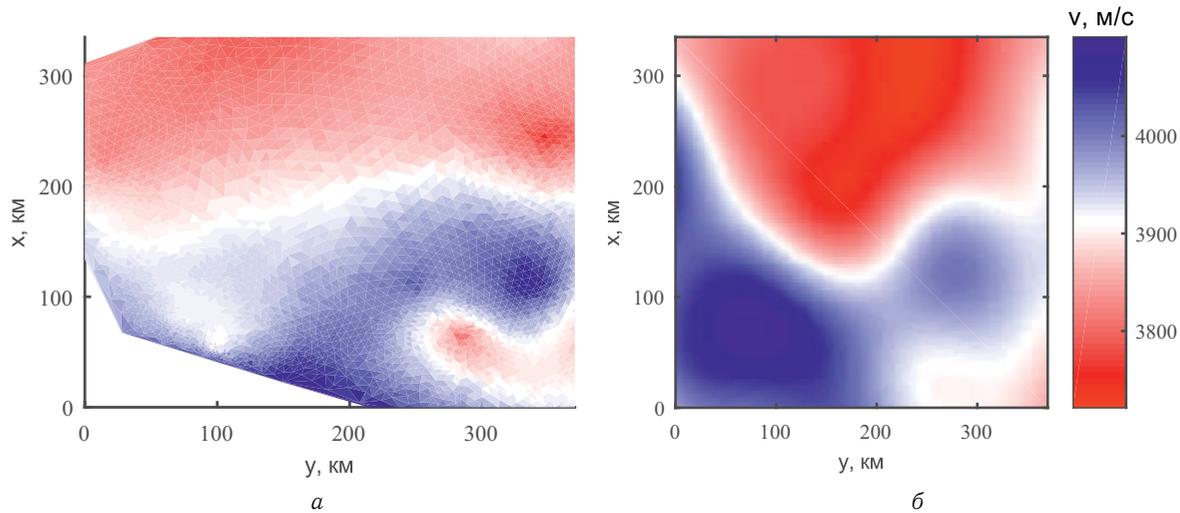


Рис. 2: Результаты восстановления глубинного строения Гавайского плюма, соответствующего частоте 0.05 Гц (длина волны около 80 км) с применением метода микросейсмического зондирования (а) и с помощью метода шумовой поверхностно-волновой томографии (б). Выбор столь низкой частоты обусловлен тем, что в методе микросейсмического зондирования расстояние между датчиками должны быть не больше длины зондирующей волны, что в рамках данного эксперимента выполняется только на очень низких частотах. Красные оттенки на рисунках соответствуют областям с пониженными скоростями распространения волн, а синие — с повышенными. На рисунке (б) цветом отображается пространственное распределение скорости поверхностной волны v , на рисунке же (а) приведено только качественное восстановление центров и примерных размеров областей с пониженными скоростями (красные оттенки) и с повышенными (синие оттенки)

разложения рельефа на его разномасштабные составляющие с последующим расчетом влияния отдельных структур на волны различной длины. Для дисперсионных методов может быть выполнен еще более простой учет рельефа, заключающийся в более точном определении длины трассы между регистрирующими системами, т. е. уточнении скорости распространения поверхностных волн.

Полученные в настоящей работе результаты указывают на то, что методы глубинного зондирования Земли, основанные на анализе характеристик поверхностных волн, могут приводить к удовлетворительным результатам не только при их применении на суше, но и в морских условиях. Рассмотренные в работе методы микросейсмического зондирования и поверхностно-волновой томографии дают близкие оценки располо-

жения и контраста неоднородности скорости, вызванных присутствием Гавайского плюма. Результаты микросейсмического зондирования, полученные по данным с донных датчиков, а также сопоставительный анализ этих результатов с томографическими оценками параметров среды, получены в настоящей работе впервые. Требуется дальнейший более тщательный анализ возможностей методов глубинного зондирования Земли по данным с автономных донных систем, в том числе и при наличии ледового покрова, прежде чем окончательно можно будет говорить о возможности успешного применения этих методов в задачах рассматриваемого типа.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 16-35-60109 и № 14-05-00762).

-
- [1] Яновская Т. Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. С-Пб.: Наука, 2015.
- [2] Matsushima T., Okada H. Butsuri-Tansa. **10**, № 1. P. 21. (1990).
- [3] Koulakov I., Shapiro N. Encyclopedia of Earthquake Engineering. P. 1. (2015).
- [4] Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Физика Земли. № 7. С. 66. (2008).
- [5] Laske G. et al. Geophys. J. Int. **187**. P. 1725. (2011).
- [6] Горбатилов А. В. Пат. РФ №2271554. // Бюл. Изобр. № 7. (2006).
- [7] Горбатилов А. В., Цуканов А. А. Физика Земли. № 4. С. 96. (2011).
- [8] Буров В. А. и др. Акустич. журнал. **51**. № 5. С. 602. (2005).
- [9] Преснов Д. А., Собисевич А. Л., Шуруп А. С. XV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» им. профессора А. П. Сухорукова. 2015 г.
- [10] Королева Т. Ю. и др. Физика Земли. № 5. (2009). С. 3.
- [11] Vensen G. D. Geophys. J. Int. № 169. P. 1239. (2007).
- [12] Цуканов А. А., Горбатилов А. В. Физика Земли. **51**, № 4. С. 94. (2015).
- [13] Жостков Р. А., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. **25**. № 1. С. 231. (2015).
- [14] Существуют методы, которые нельзя однозначно отнести к одной из отмеченных двух категорий, например,

те, которые используют сигналы от удаленных землетрясений — в этом случае некоторые характеристики источника можно определить с достаточной точностью, однако с другой стороны эта информация заранее неизвестна [3]. Первые требуют дорогостоящие, трудоемкие и не всегда безопасные искусственные сейсмические источники, параметры которых считаются известными. В пассивных же методах используются естественные микросейсмические волновые поля, всегда присутствующие

в сейсмоакустических записях на сравнительно низких частотах. Полевые измерения с применением пассивных методов проще в практической реализации, дешевле и могут проводиться с минимальными ограничениями на экологическую сторону эксперимента, поскольку не оказывают пагубного влияния на окружающую среду, поэтому в ряде геофизических задач эти методы предпочтительнее активных.

Comparison of the results of the statistical and dispersive approaches in the study of the deep structure of the Earth by the example of the Hawaiian plume

R. A. Zhostkov^{1,a}, D. A. Presnov^{1,b}, A. S. Shurup^{1,2,c}, A. L. Sobisevich^{1,d}

¹*The Shmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow 123995, Russia*

²*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*
E-mail: ^ashageraxcom@yandex.ru, ^bpresnov@physics.msu.ru, ^cshurup@physics.msu.ru, ^dalex@ifz.ru

Methods using data of surface waves are very effective for study of structure of the upper strata of the Earth, which is the most non-uniform. There are a number of such methods, originally developed for use on land, among which we should highlight microseismic sounding method (MSM) and ambient noise tomography (ANT). Unlike other methods of depth sounding MSM and ANT are easier to practical implementation, cheaper and could be performed with minimal restrictions on the environmental side of the experiment, because they don't have harmful effects on the environment. However, these techniques were used mainly on land before. In this paper, a comparison of these two approaches based on experimental data from a network of bottom seismic stations located in the area of the Hawaiian Islands. The results of microseismic sounding derived according to the bottom stations, as well as a comparative analysis of those results with tomographic estimates of parameters of the medium obtained in the present work for the first time. These results indicate that the methods of Earth sounding based on an analysis of the characteristics of surface waves can lead to satisfactory results, not only when they are used on land, but even in marine conditions.

PACS: 93.85.Rt

Keywords: surface-wave tomography, microseismic sounding method, plum, hot spot.

Сведения об авторах

1. Жостков Руслан Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: shageraxcom@yandex.ru.
2. Преснов Дмитрий Александрович — вед. инженер; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: presnov@physics.msu.ru.
3. Андрей Сергеевич Шуруп — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: shurup@physics.msu.ru.
4. Алексей Леонидович Собисевич — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (499) 254-90-80 e-mail: alex@ifz.ru.