

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД.  
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.34.063,550.344.56,550.347.29,550.347.62

ВЛИЯНИЕ ЗАГЛУБЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ  
НА СПЕКТРАЛЬНОЕ ОТНОШЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ  
СЛУЧАЙНОГО ПОЛЯ ВОЛН РЭЛЕЯ

© 2018 г. А. А. Цуканов\*, А. В. Горбатиков\*\*

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 Москва, Большая Грузинская улица 10, стр. 1

\*e-mail: [microseismic@yandex.ru](mailto:microseismic@yandex.ru)

\*\*e-mail: [avgor70@mail.ru](mailto:avgor70@mail.ru)

Поступила в редакцию 14.11.2016 г.

Исследование статистических параметров случайного микросейсмического поля Земли позволяет получить оценки свойств и строения земной коры и верхней мантии. Используются различные приемы наблюдений и обработки микросейсмических записей, которые разбиваются на несколько групп пассивных методов сейсмологии. Среди них известны метод поверхностно-волновой томографии, метод спектрального  $H/V$ -отношения компонент в поверхностной волне и развиваемый в настоящее время метод микросейсмического зондирования (ММЗ), где используется спектральное отношение вертикальных компонент между парами пространственно разнесенных станций  $V/V_0$ . Выяснено в ходе предыдущих исследований, что эти отношения являются устойчивыми статистическими параметрами случайного поля, не зависящими от свойств источников микросейсм. В настоящей статье предлагается расширить указанный подход и исследовать перспективы использования отношения горизонтальных компонент  $H_1/H_2$  микросейсмического поля. На основе численного моделирования исследовано влияние заглубленной скоростной неоднородности на спектральное отношение горизонтальных компонент случайного поля фундаментальных мод Рэлея, исходя из представления, что микросейсмическое поле Земли представлено этими волнами в значительной части частотного спектра.

**Ключевые слова:** волны Рэлея, горизонтальные компоненты, спектральное отношение, микросейсмическое поле, метод микросейсмического зондирования

DOI: 10.7868/S0320791918010197

## ВВЕДЕНИЕ

Известен ряд пассивных сейморазведочных методов, использующих в качестве зондирующего сигнала фоновый микросейсмический шум Земли, который является случайным процессом. В методах поверхностно-волновой томографии [1–4] и SPAC-методе пространственной автокорреляции [5] (а также в его более поздних модификациях [6–14]) информативным параметром служит кросс-корреляционная функция поверхностных волн [15]. В других пассивных методах основная информация извлекается из спектральных отношений амплитуд или спектрального соотношения между компонентами скоростей или смещений в поверхностной волне. Такие относительные безразмерные параметры случайного поля оказываются достаточно устойчивыми, эти величины не зависят от свойств источников микросейсм [16]. Здесь можно вспомнить метод спектрального  $H/V$ -отношения компонент в поверхностной волне (HVSR) [17–20] и метод мик-

росейсмического зондирования (ММЗ), в котором используется спектральное отношение вертикальных компонент  $V/V_0$  записи микросейсм между зондирующей и базовой станциями [21, 22]. Последний успешно применяется для решения как фундаментальных [23–25], так и прикладных задач, в том числе для поиска и разведки полезных ископаемых (руды, кимберлитовых трубок и др.) [26–29]. На его основе производится также картирование разломов земной коры, выявление карстовых зон и суффозионных процессов [30].

ММЗ имеет как ряд преимуществ, так и ограничения по сравнению с другими методами сейморазведки. В частности, использование спектральной мощности только вертикальной компоненты смещения позволяет не учитывать присутствие в микросейсмическом сигнале волн Лява, а также объемных волн сдвига с близким к вертикали падением. Такая естественная фильтрация сигнала по типу волн обеспечивает определенную помехозащищенность ММЗ, позволяя

рассматривать в качестве базовой модели формирования сигнала рассеяние волн именно рэлеевского типа на заглабленных неоднородностях. С этой точки зрения, например, HVSR оказывается более ограниченным по условиям применения по сравнению с ММЗ.

Тем не менее, использование горизонтальных компонент в некоторых случаях может способствовать получению ценной информации о свойствах и строении земной коры и верхней мантии, а также решению прикладных задач при исследовании осадочного чехла. Интерес представляет изучение реакции горизонтальных компонент микросейсмического поля на присутствие заглабленных компактных скоростных неоднородностей. Это обуславливается большим удобством возможного использования отношений горизонтальных компонент, поскольку в отличие от отношения  $H/V$  горизонтальные компоненты полностью идентичны друг другу с точки зрения типа волн, к которым они относятся в микросейсмическом поле. В частности, авторами получены предварительные экспериментальные данные, говорящие в пользу того, что перспективным направлением развития ММЗ может стать учет горизонтальных компонент микросейсмического сигнала.

Рассмотренный ниже подход может оказаться полезным при комплексировании со стандартным подходом в ММЗ и другими геофизическими методами. В любом случае, любая независимая информация о структуре геологической среды может увеличить надежность оценок, сужая неоднозначность геологической интерпретации.

Результаты данного этапа исследований предполагается применять к тем областям микросейсмического спектра, которые формируются под влиянием глубинных горизонтов Земли с незначительной скоростной дисперсией (например, от кровли фундамента и глубже). В этом частотном диапазоне фундаментальные моды Рэлея будут превалировать над остальными в составе микросейсмического поля. Спектральные области, формируемые под влиянием ярко выраженной слоистости и отчетливых дисперсионных свойств, в которых наряду со значительными по амплитуде высшими модами Рэлея формируются высокоамплитудные моды Лява, предполагается исследовать в дальнейшем.

Будем исходить из очевидного соображения, что изотропное случайное поле поверхностных волн в однородной или слоистой среде будет во всех точках поверхности иметь близкое к единице отношение горизонтальных компонент смещения  $\langle H_1/H_2 \rangle_t \approx 1$ , где угловые скобки подразумевают усреднение во времени, при этом  $H_1 = U_N \cos \varphi + U_E \sin \varphi$ ,  $H_2 = U_E \cos \varphi - U_N \sin \varphi$ , где  $U_N$  и  $U_E$  — горизонтальные компоненты смеще-

ния соответственно вдоль меридиана и вдоль параллели,  $\varphi$  — некоторый угол. Можно ожидать, что наличие ориентированных заглабленных неоднородностей, особенно протяженных вдоль одного из горизонтальных направлений, будет искажать поле  $\langle H_1/H_2 \rangle_t$  в некотором диапазоне частот, связанном с глубиной залегания неоднородности, подобно тому, как это происходит с амплитудой вертикальной компоненты в методе микросейсмического зондирования. Другими словами, присутствие вытянутой вдоль одного из горизонтальных направлений неоднородности будет локально возмущать изотропность микросейсмического поля в точках дневной поверхности, расположенных непосредственно над ней и на некотором расстоянии. Причем характер возмущений будет зависеть от таких параметров, как форма, размеры, глубина залегания и механические свойства неоднородности.

Целью настоящей статьи является выявление закономерностей формирования поля спектрального отношения горизонтальных компонент  $H_1/H_2$  в изотропном поле поверхностных волн Рэлея в присутствии заглабленной скоростной неоднородности.

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Теория распространения и рассеяния поверхностных волн развита достаточно хорошо, в частности благодаря работам отечественных исследователей [31–35]. Использование аппарата численных методов позволяет проводить многопараметрический анализ волнового поля для различных моделей неоднородности упругой среды и в различных условиях облучения [36–41].

Параллельный программный комплекс, который разрабатывался и оптимизировался для решения прямой задачи метода микросейсмического зондирования, начиная с работ [36, 37] использовался для теоретического обоснования ММЗ и оценки его точности и разрешающей способности [22], влияния параметров неоднородности на амплитудный эффект и оптимальное значение коэффициента глубинной привязки [22], а также для оценки влияния коэффициента Пуассона материала неоднородности на ее изображение в ММЗ и оценки относительного вклада дополнительного члена в амплитудной реакции ММЗ в случае двух близкорасположенных заглабленных тел, связанного с тем, что неоднородности находятся в рассеянном поле друг друга [40].

Очевидно, что интересующие нас эффекты взаимодействия поверхностной волны с неоднородностью можно оценить только в трехмерной постановке задачи. Для достижения сформулированных целей, ввиду ресурсоемкости трехмерной задачи и необходимости проведения численных

экспериментов для нескольких углов облучения  $\gamma$  (не менее восьми) с целью дальнейшего суммирования полученных полей, была использована модификация программного комплекса с полнотой явной схемой, которая описана в предшествующем исследовании [40]. Здесь коротко приведем основную систему уравнений без детального описания численной реализации.

Пусть  $XYZ$  – декартова система координат, где  $Y$  – вертикальная ось, направленная к центру Земли,  $y = 0$  – дневная поверхность. Для точек полупространства  $y > 0$  уравнение движения упругой среды

$$\rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 u_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \sum_k \partial_k \sigma_{ik}(\mathbf{r}, t) + f_i(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

где  $\partial_k \equiv \frac{\partial}{\partial x_k}$  – частная производная по пространственной координате  $x_k$ ,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор произвольной точки упругой среды,  $t$  – время,  $u(\mathbf{r}, t)$  – поле смещений точек среды;  $\sigma_{ik}$  – компоненты тензора упругих напряжений  $\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t)$ ,  $f(\mathbf{r}, t)$  – плотность внешней силы. В рамках линейной теории упругости для изотропной среды

$$\hat{\sigma}(\mathbf{r}, t) = \lambda(\mathbf{r}) \hat{E} \text{trace} \hat{u}(\mathbf{r}, t) + 2\mu(\mathbf{r}) \hat{u}(\mathbf{r}, t) \quad (2)$$

– обобщенный закон Гука, где  $\lambda(\mathbf{r})$ ,  $\mu(\mathbf{r})$  – 1-й и 2-й модули Ламе,  $\hat{E}$  – единичный тензор,  $\hat{u}$  – тензор деформации, который при малых амплитудах смещения приближенно описывается равенством [42, 43]

$$u_{ij} = \frac{1}{2} (\partial_j u_i + \partial_i u_j). \quad (3)$$

Условие на дневной поверхности  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_{yz} = 0$  – отсутствие нормальных напряжений – приводит к системе уравнений при  $y = 0$

$$\begin{cases} \partial_y u_x + \partial_x u_y = 0, \\ \partial_x u_x + \partial_z u_z = -\kappa(\mathbf{r}) \partial_y u_y, \\ \partial_z u_y + \partial_y u_z = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\kappa(\mathbf{r}) = 1 + 2 \frac{\mu(\mathbf{r})}{\lambda(\mathbf{r})}$ , плоскость  $x = 0$  – источник плоской волны Рэлея, распространяющейся в положительном направлении оси  $x$  (см. рис. 1) с единичной амплитудой вертикальных колебаний на поверхности и циклической частотой  $\omega$  [44]. По оси  $z$  заданы периодические граничные условия  $u_i(x, y, Z, t) = u_i(x, y, 0, t)$  с целью минимизации краевых искажений фронта плоской волны. Граничные условия на бесконечности  $u_i(x \rightarrow \infty, t) = 0$ ,  $u_i(y \rightarrow \infty, t) = 0$ . Начальные условия  $u_i(\mathbf{r}, t \leq 0) = 0$ ,  $\frac{\partial u_i}{\partial t}(\mathbf{r}, t \leq 0) = 0$ .

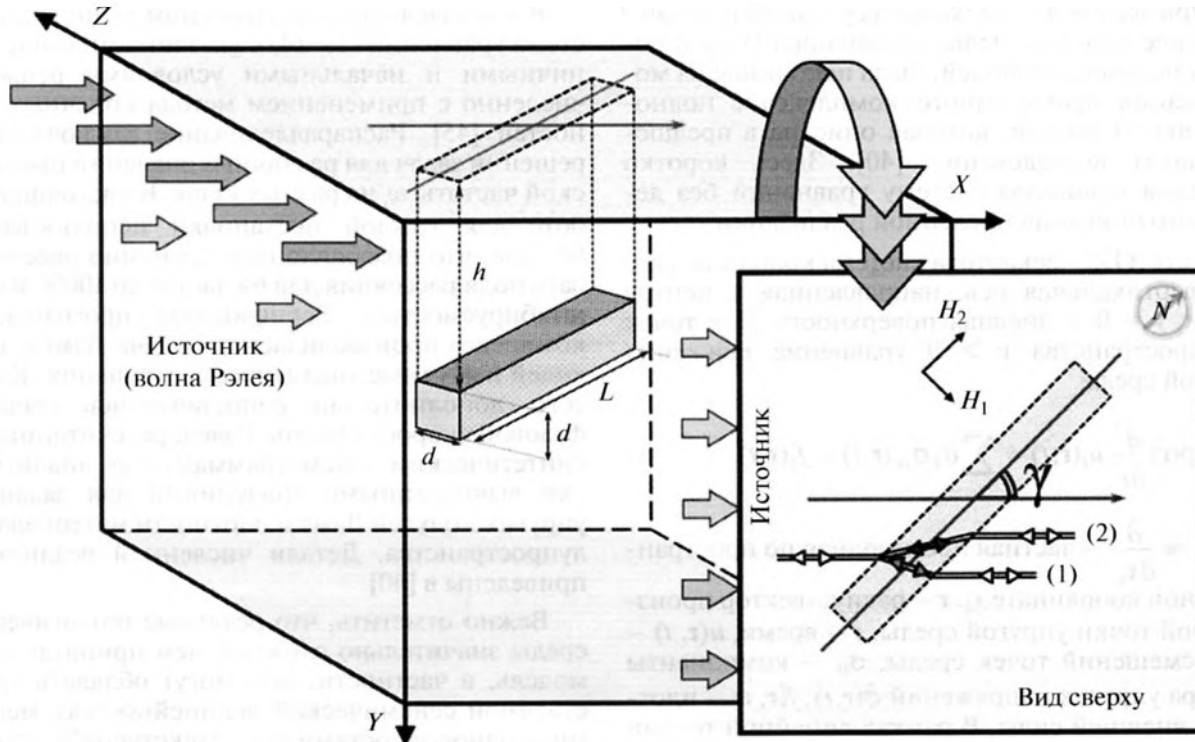
В параллельном программном комплексе система уравнений (1)–(4) с указанными выше граничными и начальными условиями решается численно с применением метода конечных разностей [45]. Распараллеливание заключалось в решении задач для различных значений циклической частоты  $\omega$  на разных узлах. В настоящей работе для каждой постановки использовалось 64 ядра, что позволяло одновременно рассчитывать поля рассеяния для 64 частот со 100%-й масштабируемостью. Верификация программного комплекса производилась на задаче Лэмба, имеющей известные аналитические решения. Кроме того, дополнительно сопоставлялись значения фазовой скорости волны Рэлея, рассчитанные по синтетическим сейсмограммам, с ее аналитическими вычисленными значениями для заданных упругих модулей Ламе и плотности материала полупространства. Детали численной реализации приведены в [40].

Важно отметить, что реальные геологические среды значительно сложнее, чем принятая нами модель, в частности, они могут обладать существенной сейсмической нелинейностью, мелкими неоднородностями (т. н. “текстурой”), гетерогенностью и сейсмической активностью, т.е. не только переизлучать, но и излучать шумовое поле. Однако в рамках настоящей работы для выявления основных закономерностей влияния структуры среды на спектральное отношение горизонтальных компонент случайного поля рэлевских волн мы ограничились моделью линейно-упругой изотропной среды без затухания.

## ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ПОЛЕЙ

Схема численного эксперимента приведена на рис. 1. Заглубленная неоднородность протяженной формы облучается со всех сторон поверхностной волной Рэлея таким образом, что угол облучения  $\gamma$  принимает дискретный набор значений  $0 \leq \gamma_i < 2\pi$  с шагом  $\Delta\gamma = 2\pi/n$ . В проведенной серии экспериментов поле рассчитывалось для  $n = 8$  углов. Для каждого угла облучения  $\gamma$  и каждой частоты облучающей рэлеевской волны  $\omega$  вычислялся полный (трехкомпонентный) вектор амплитуды смещения  $\mathbf{a}(x, z, \omega)$  в каждой точке поверхности, при этом отдельно сохранялись для последующего анализа проекции горизонтальной компоненты  $\mathbf{a}_H(x, z)$  на перпендикулярное  $H_1(x, z)$  и продольное  $H_2(x, z)$  “оси” неоднородности направления. Полученные для каждого угла  $\gamma$  поля суммировались (а именно, суммировалась интенсивности реакции), после чего строилось их отношение в каждой точке поверхности  $(x, z)$  отдельно для каждой частоты  $\omega$  облучающей волны. Полученные таким образом поля  $H_1/H_2$





**Рис. 1.** Постановка численного эксперимента и схематичное объяснение наблюдаемого эффекта. В случае низкоскоростной неоднородности горизонтальная компонента падающей поверхностной волны преломляется по пути (1), увеличивая ортогональную к “оси” неоднородности проекцию  $H_1$ . В случае высокоскоростной неоднородности преломление происходит по лучу (2), при этом локально увеличивается продольная проекция  $H_2$  горизонтальной компоненты колебаний в поверхностной волне.

пропорциональны отношению квадратов проекции амплитуды на указанные ортогональные горизонтальные направления. Результирующие сейсмические кубы строились в пространстве  $\{x, z, \lambda_R(\omega)\}$ , где по вертикали откладывалась соответствующая циклической частоте  $\omega$  длина волны Рэлея  $\lambda_R$  в однородной среде с параметрами вмещающей среды (по аналогии с ММЗ).

### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Размерность расчетной области составляла  $210 \times 108 \times 180$  точек, что при шаге сетки  $\delta r = 50$  м соответствует фрагменту геологической среды размером  $10.5 \times 5.4 \times 9.0$  км<sup>3</sup>. Во всех расчетах неоднородность имела длину  $L = 2050$  м при одинаковой ширине и глубине  $d = 350$  м (рис. 1). Расположение субмеридиональное (длинной стороной вдоль меридиана). Для определенности направление на север будем считать совпадающим с направлением оси  $x$ . Глубина кровли неоднородности  $h = 550$  м, подошвы —  $900$  м (рис. 1). Величина шага интегрирования по времени, выбранная с учетом условия Куранта, составляла  $\tau = 0.0026$  с, что обеспечивало дискретизацию синтетического сигнала с частотой  $f_d = 380$  Гц. Каждая

симуляция длилась 2373 временных шагов, что при описанных условиях соответствует 6.2 секундам.

Параметры вмещающей среды были выбраны в соответствии с предыдущими исследованиями [22, 40] для удобства сравнения полученных полей рассеяния:  $v_p = 3194.74$  м/с,  $v_s = 1843.91$  м/с,  $v_R = 1695.29$  м/с. При плотности  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, модули Ламе  $\lambda = \mu = 6.8$  ГПа. Коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ .

Были выполнены две серии расчетов для различных свойств материала неоднородности: 1 — низкоскоростной:  $R_p = 0.8$ ,  $R_s = 0.8$ ,  $\nu = 0.25$ , и 2 — высокоскоростной:  $R_p = 1.25$ ,  $R_s = 1.25$ ,  $\nu = 0.25$ , где  $R_p = v_p/v_p^0$  и  $R_s = v_s/v_s^0$  — отношения скоростей  $P$ - и  $S$ -волн в неоднородности к скоростям  $P$ - и  $S$ -волн во вмещающей среде.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численных экспериментов, проведенных по описанной выше схеме, позволяют утверждать, что протяженная в горизонтальном направлении заглубленная неоднородность устойчиво влияет на отношение горизонтальных компонент поверхностно-волнового поля. Это

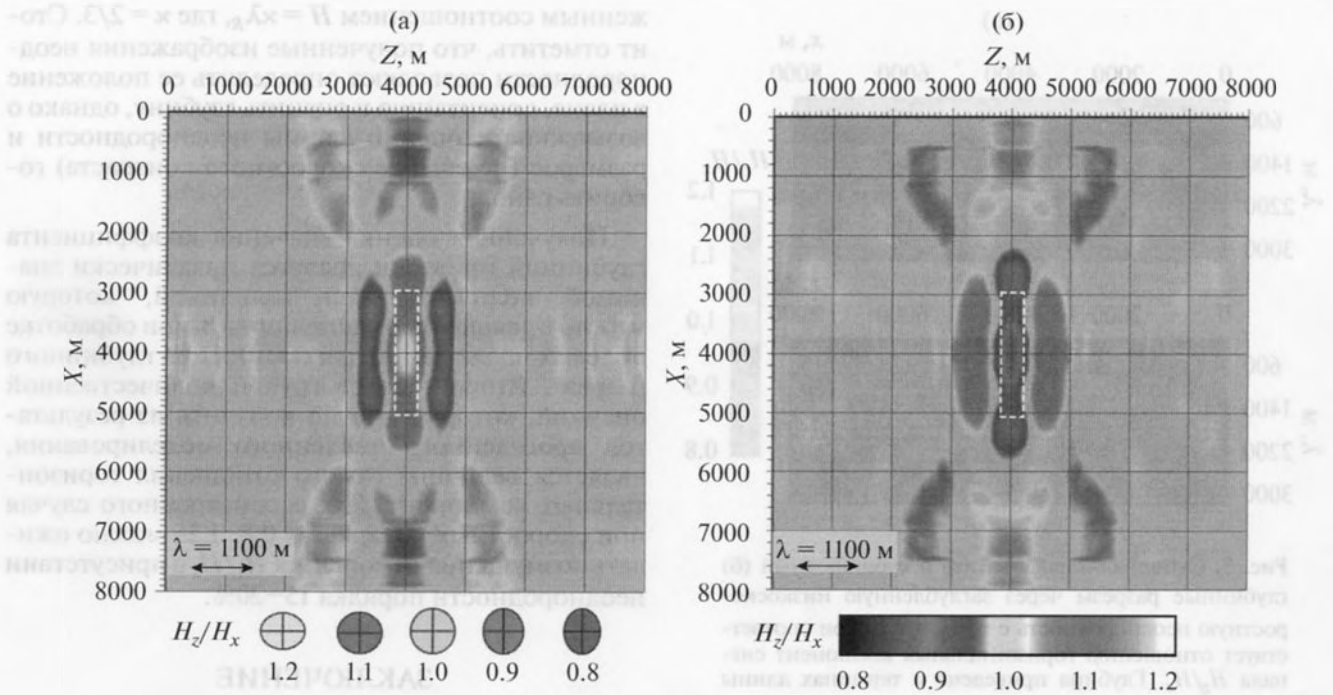


Рис. 2. Отношение горизонтальных компонент  $H_z/H_x$  “случайного” изотропного поля поверхностных волн Рэлея в присутствии заглубленной низкоскоростной неоднородности со скоростным контрастом  $v/v_0 = 0.8$  (а) и высокоскоростной неоднородности с контрастом 1.25 (б). Поля представлены в одинаковой шкале для длины облучающей волны 1100 м. Белый контур соответствует проекции границ неоднородности на дневную поверхность. Эллипсы схематично показывают отношение  $H_z/H_x$ .

влияние носит как локальный характер в пространственном отношении, т.е. проявляется в некоторой окрестности вблизи неоднородности, так и имеет локальный характер в спектральной области, внося возмущения лишь в некотором диапазоне частот зондирующего сигнала. На рис. 2 представлены полученные поля для случаев низкоскоростной (а) и высокоскоростной (б) неоднородности. При этом, поскольку нам *a priori* известна ориентация заданной неоднородности, для определенности в качестве  $H_1$  была выбрана горизонтальная компонента сигнала, перпендикулярная большей стороне неоднородности  $H_z$ , в качестве  $H_2$  – параллельная, т.е.  $H_x$ . При выбранных условиях залегания (глубина кровли 550 м, подошвы – 900 м) положение неоднородности хорошо картируется положительной аномалией в поле  $H_1/H_2$  на частоте микросейсмического сигнала, соответствующей длине рэлеевской волны  $\lambda_R = 1100$  м (рис. 2а). Высокоскоростная неоднородность также обнаруживает свое присутствие в этом поле, однако проявляется понижением значения  $H_1/H_2$  в своей окрестности (рис. 2б). На рис. 2 можно визуально сопоставить положение контура неоднородности с областью  $H_1/H_2 > 1.1$  в случае низкоскоростной неоднородности и с областью  $H_1/H_2 < 0.9$  в случае высокоскоростной.

Другими словами, протяженная низкоскоростная неоднородность “увеличивает” в области над собой (в некотором диапазоне частот  $\omega$ ) горизонтальную компоненту поверхностной волны Рэлея (в среднем, при облучении со всех направлений), перпендикулярную ее длинной стороне, и “уменьшает” компоненту, параллельную ей. Протяженная неоднородность с противоположным контрастом скоростей “усиливает” параллельную компоненту и “снижает” перпендикулярную горизонтальную компоненту поверхностно-волнового поля. Такой эффект можно объяснить в рамках закона преломления упругих волн на границе раздела двух сред с разными механическими свойствами. Действительно, если рассмотреть падение облучающей поверхностной волны с одного направления под произвольным острым углом облучения  $\gamma$  (рис. 1, вид сверху), то, взаимодействуя с низкоскоростной неоднородностью, “луч” отклонится таким образом, что его перпендикулярная компонента  $H_1$  в области неоднородности увеличится, а параллельная  $H_2$  – уменьшится (рис. 1, путь (1)). В случае перехода в среду, характеризующуюся большей скоростью волн, луч падающей волны преломится по траектории (2) (рис. 1), увеличивая компоненту  $H_2$  и уменьшая  $H_1$  в области неоднородности. Такое

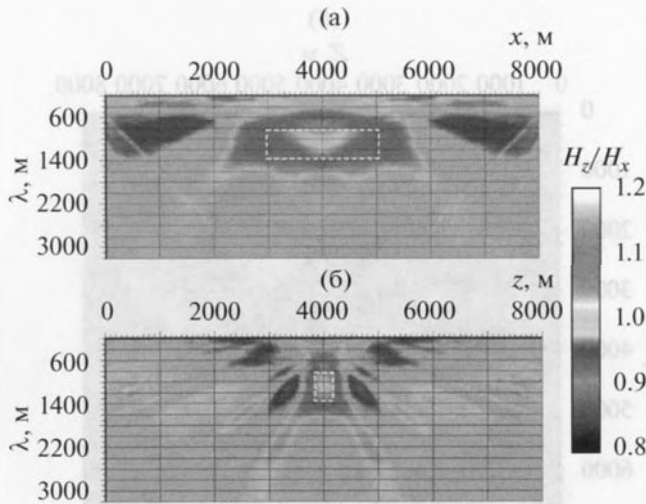


Рис. 3. Субмеридиональный (а) и субширотный (б) глубинные разрезы через заглубленную низкоскоростную неоднородность с  $v/v_0 = 0.8$ . Тон соответствует отношению горизонтальных компонент сигнала  $H_z/H_x$ . Глубина приведена в терминах длины волны  $\lambda_R$ , пунктиром указано положение неоднородности при коэффициенте глубинной привязки  $\kappa = 2/3$ .

объяснение показывает, что полученный результат не противоречит законам распространения упругих волн, однако больше носит иллюстративный характер, поскольку при таком соотношении размеров неоднородности (толщина 350 м) и длины облучающей волны (1100 м) некорректно оставаться в рамках лучевой модели распространения волн.

Построение глубинного разреза на основе полученных синтетических записей был сделан по аналогии с методом микросейсмического зондирования, где для привязки карт вариаций относительной интенсивности вертикальной компоненты поверхностной волны к глубине используется длина волны фундаментальной моды рэлеевской волны, умноженная на коэффициент глубинной привязки  $k_G$  [21]. Разрез вдоль субмеридионального профиля, проходящего через центр низкоскоростной неоднородности, представлен на рис. 3а. Вертикальная ось соответствует длине волны фундаментальной моды облучающей волны Рэлея. Поперечный разрез через середину неоднородности приведен на рис. 3б. При значениях коэффициента глубинной привязки  $\kappa = 0.65-0.75$  контур неоднородности совмещается с зоной положительной аномалии на разрезе. Оптимальным с точки зрения совпадения кровли и подошвы неоднородности с границами зоны  $H_1/H_2 \geq 1.2$  значением коэффициента глубинной привязки является  $\kappa \approx 2/3$  (пунктирный контур на рис. 3). Таким образом, для оценки глубины залегания неоднородности можно пользоваться прибли-

женным соотношением  $H = \kappa \lambda_R$ , где  $\kappa \approx 2/3$ . Стоит отметить, что полученные изображения неоднородности позволяют определить ее положение в плане, ориентацию и оценить глубину, однако о возможности оценки формы неоднородности и размеров (не зная ее скоростного контраста) говорить рано.

Полученная оценка значения коэффициента глубинной привязки является практически значимой количественной величиной, которую можно в дальнейшем использовать при обработке полевых наблюдений для построения глубинного разреза. Второй, более грубой количественной оценкой, которую можно получить из результатов проведенного численного моделирования, является величина самого отношения горизонтальных компонент. Для рассмотренного случая при скоростных контрастах 0.8, 1.25 можно ожидать возмущения отношения  $H_1/H_2$  в присутствии неоднородности порядка 15–20%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование на численной модели по влиянию заглубленных протяженных по горизонтали неоднородностей на отношение горизонтальных компонент в “случайном” модельном поле поверхностных волн Рэлея позволило выявить несколько закономерностей. Во-первых, низкоскоростная неоднородность способствует увеличению отношения нормальной к продольной горизонтальной компоненте в поверхностной волне, в то время как высокоскоростная увеличивает отношение продольной компоненты по отношению к нормальной. Во-вторых, коэффициент глубинной привязки для восстановления глубинного строения среды на основе отношения горизонтальных компонент оценивается величиной  $\kappa \approx 0.65-0.75$  (при скоростных контрастах 0.8–1.25 неоднородности и рассмотренных параметрах вмещающей среды). В-третьих, получена оценка величины возможного возмущения от неоднородности с рассмотренными свойствами и условиями залегания. Для низкоскоростного включения с контрастом скоростей 0.8 величина отношения перпендикулярной горизонтальной компоненты к параллельной может достигать 1.2, в то время как для высокоскоростного включения с контрастом 1.25 может уменьшаться до 0.8.

Суммируя сказанное выше, можно предположить, что в реальных условиях поля  $H_1(\varphi)/H_2(\varphi)$  для разных значений  $\varphi$ , в том числе поле  $H_E/H_N$ , а также поле  $H_{\min}/H_{\max}$  (горизонтальная эллиптичность) и векторное поле  $\mathbf{a}_H$  преимущественной ориентации большой оси эллипсов горизонтального смещения, могут дать дополнительную ценную информацию о строении, свойствах и процессах геологической среды. Также информатив-



ным в реальных условиях может оказаться поле пространственной корреляции угла векторов  $\mathbf{a}_{//}$  в микросейсмическом сигнале, которое позволит выявлять наличие контрастных протяженных по горизонтали геологических объектов или областей с близкими механическими свойствами.

При этом важно помнить, что в горизонтальных компонентах микросейсмического поля помимо фундаментальной моды волны Рэлея, как в исследованном здесь случае, могут присутствовать ее высшие моды, а также волны Лява, которые следует учитывать, особенно в случаях наличия контрастных субгоризонтальных границ. Полученные результаты не только показывают перспективность использования этого подхода в геофизике, но и ставят много новых вопросов, требующих проведения ряда дополнительных исследований.

Решение перечисленных выше задач при дальнейшем развитии этого направления может расширить геофизический инструментарий для исследования строения и процессов земной коры и верхней мантии.

Параллельные расчеты выполнены в 2015 г. на высокопроизводительном кластере “Ломоносов” Научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В. Ломоносова [46].

Выполненные работы полностью поддержаны за счет Гранта Президента Российской Федерации № МК-6823.2015.5 “Экспериментальные и численные исследования влияния неоднородности среды на параметры поля поверхностных волн”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shapiro N.M., Campillo M.* Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L07614.
2. *Snider R.* Extracting the Green's function from correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase // *Phys. Rev E.* 2004. V. 69. № 4. P. 046610.
3. *Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С.* Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // *Физика Земли.* 2009. № 5. С. 1–12.
4. *Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л., Королева Т.Ю.* Скоростное строение Карпатской зоны по данным шумовой поверхностно-волновой томографии // *Физика Земли.* 2014. № 5. С. 44–51.
5. *Aki K.* Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors // *Bull. Earthq. Res. Inst.* 1957. V. 35. № 3. P. 415–456.
6. *Malagnini L., Rovelli A., Hough S.E., Seeber L.* Site amplification estimates in the Garigliano Valley, Central Italy, based on dense array measurements of ambient noise // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1993. V. 83. P. 1744–1755.
7. *Chouet B., De Luca G., Milina G., Dawson P., Martini M., Scarpa R.* Shallow velocity structure of Stromboli Volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1998. V. 88. P. 653–666.
8. *Ohori M., Nobata A., Wakamatsu K.* A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2002. V. 92. P. 2323–2332.
9. *Zhang S.H., Chan L.S., Xia J.* The selection of field acquisition parameters for dispersion images from multi-channel surface wave data // *Pure. Appl. Geophys.* 2004. V. 161. P. 185–201.
10. *Chavez-Garcia F.J., Rodriguez M., Stephenson W.R.* An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2005. V. 95. P. 277–293.
11. *Okada H.* Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method // *Exploration Geophysics.* 2006. V. 37. P. 73–85.
12. *Tada T., Cho I., Shinozaki Y.* A two-radius circular array method: inferring phase velocity of Love waves using microtremor records // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L10303. doi 10.1029/2006GL025722
13. *Asten M.W.* On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC method // *Geophysics.* 2006. V. 71. P. V153–V162. doi 10.1190/1.2345054
14. *Garcia-Jerez A., Luzon F., Navarro M.* An alternative method for calculation of Rayleigh and Love wave phase velocities by using three-component records on a single circular array without a central station // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173 (3). P. 844–858. doi 10.1111/j.1365-246X.2008.03756.x
15. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Ultrasonic without a source: thermal fluctuation correlations at MHz frequencies // *Phys. Rev Lett.* 2001. V. 87. № 13 P. 134301.
16. *Горбатикув А.В., Степанова М.Ю.* Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов. // *Физика Земли.* 2008. № 1. С. 57–67.
17. *Arai H., Tokimatsu K.* Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra // *Proc. of the 12th world conference on earthquake engineering, paper 2232, CD-ROM.* 2000.
18. *Scherbaum F., Hinzen K.-G., Ohrnberger M.* Determination of shallow wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 152. P. 597–612.
19. *Tanimoto T., Alvizuri C.* Inversion of the HZ ratio of microseisms for S-wave velocity in the crust // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 165. № 1. P. 323–335.
20. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute.* 1989. V. 30. № 1. P. 25–33.
21. *Горбатикув А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е.* Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // *Физика Земли.* 2008. № 7. С. 66–84.

22. Горбати́ков А.В., Цука́нов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–96.
23. Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnosó J., Stepanova M.Yu., Benavent M., Tsukanov A.A. New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from low-frequency microseismic sounding. An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis // Journal of Surveys in Geophysics. 2013. V. 34(4). P. 463–489.
24. Ку́гаенко Ю.А., Салты́ков В.А., Горбати́ков А.В., Степа́нова М.Ю., Абкады́ров И.Ф. Новые данные о глубинном строении северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 539–543.
25. Цука́нов А.А., Горбати́ков А.В., Степа́нова М.Ю., Ку́гаенко Ю.А., Салты́ков В.А. Численное моделирование эффекта сверхразрешения в методе микросейсмического зондирования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Материалы Четвертой научно-технической конференции, 30 сентября–4 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский: [www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/model/Cukanov\\_etc.pdf](http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/model/Cukanov_etc.pdf)
26. Gorbatikov A.V., Kalinina A.V., Volkov V.A., Arnosó J., Vieira R., Velez E. Results of analysis the data of microseismic survey at Lanzarote Island, Canary, Spain // Pageoph. Topical issue “Geodetic and geophysical effects associated to seismic and volcanic hazards”. 2004. V. 161. № 7. P. 1561–1578.
27. Горбати́ков А.В., Лари́н Н.В., Моисеев Е.И., Беля́шов А.В. Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // Докл. РАН. 2009. Т. 428. № 4. С. 526–530.
28. Горбати́ков А.В., Степа́нова М.Ю., Цука́нов А.А., Тина́кин О.В., Комаров А.Ю., Оди́щов С.Л., Токман А.К. Новая технология микросейсмического зондирования в задачах изучения глубинного строения месторождений нефти и газа // Нефтяное хозяйство. 2010. № 6. С. 15–17.
29. Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y., Tsukanov A.A., Odintsov S.L., Tinakin O.V., Komarov A.Y. Particularities of Astrakhan gas field deep structure resulting from microseismic sounding technique application. In: 4th EAGE St. Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences – New Discoveries through Integration of Geosciences, May 2010. doi 10.3997/2214-4609.20145535
30. Рого́жин Е.А., Хара́зова Ю.В., Горбати́ков А.В., Ша́нов С., Степа́нова М.Ю., Митев А. Строение и современная активность Интрамизийского разлома в Северо-Восточной Болгарии по комплексу новых геолого-геофизических методов // Физика Земли. 2009. № 9. С. 66–74.
31. Егоро́в Н.Н. Затухание волн Рэлея в упругом слое, лежащем на полупространстве // Акуст. журн. 1961. Т. 7. № 3. С. 378–380.
32. Шевченко В.В. Прохождение поверхностной волны над неоднородным участком плоской импедансной поверхности // Акуст. журн. 1963. Т. 9. № 3. С. 351–358.
33. Викторов И.А., Каёкина Т.М. Рассеяние ультразвуковых рэлеевских волн на моделях поверхностных дефектов // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С. 30–33.
34. Заславский Ю.М. Волны Лява, возбуждаемые движущимся источником // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 87–94.
35. Кокшайский А.И., Коробов А.И., Ширгина Н.В. Диагностика упругих свойств плоской границы двух шероховатых сред поверхностными акустическими волнами // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 152–157.
36. Tsukanov A.A., Gorbatikov A.V., Stepanova M.Y. Numerical simulation of Rayleigh waves interaction with compact deepened velocity heterogeneities. In: 4th EAGE St. Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences – New Discoveries through Integration of Geosciences, May 2010. doi 10.3997/2214-4609.20145551
37. Цука́нов А.А., Калабу́хов Д.И., Романов А.И., Горбати́ков А.В., Сердобольская М.Л., Грачев Е.А. Моделирование волн Рэлея в неоднородной среде с использованием вычислительных систем с параллельной архитектурой. Учебное пособие. Препринт №1/2010. МГУ, физический факультет, 2010. 62 с.
38. Беля́нкова Т.И., Кали́нчук В.В. Особенности локализации волнового поля в преднапряженном функционально-градиентном слое // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 219–234.
39. Тютекин В.В. Моделирование и синтез поглотителей упругих волн на границе твердого тела: падение продольной волны // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 534–540.
40. Цука́нов А.А., Горбати́ков А.В. Метод микросейсмического зондирования: Влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–94.
41. Фокина М.С., Фокин В.Н. Отражение плоских волн от упругой слоистой среды: резонансный подход и численное моделирование // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 690–697.
42. Бреховских Л.М. Поверхностные волны в акустике. Обзор // Акуст. журн. 1959. Т. 5. № 1. С. 4–13.
43. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. М.: Мир, 1983. Т. 1. 520 с.
44. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
45. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
46. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin V.I., Opanasenko V. “Lomonosov”: Supercomputing at Moscow State University. In: “Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale” (Chapman & Hall/CRC Computational Science). P. 283–307. Boca Raton, USA, CRC Press, 2013.