

УДК 550.344.56

О РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН РЭЛЕЕВСКОГО ТИПА В СЛОИСТОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

© 2020 г. Член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич¹, Д. А. Преснов^{1,*}

Поступило 24.03.2020 г.

После доработки 31.03.2020 г.

Принято к публикации 01.04.2020 г.

Исследованы особенности распространения упругих поверхностных волн в слоистой геофизической среде, которые могут быть использованы в решении задач поиска заглубленных неоднородностей. Посредством численного моделирования установлены соотношения для основных информативных параметров в известных поверхностно-волновых амплитудных методах сейсморазведки. Представлены результаты расчетов кривых чувствительности эллиптичности и относительной интенсивности поверхностных волн к вариациям скорости поперечных волн в слоях, расположенных на различной глубине.

Ключевые слова: поверхностная волна, волна Рэлея, слоистая среда, математическое моделирование, ММЗ, Н/V, доминантная частота

DOI: 10.31857/S2686739720060183

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных свойств упругих поверхностных волн, определяющих их практическую значимость, является дисперсия — зависимость скорости распространения от частоты. Известны результаты успешного использования поверхностных волн для глубинного зондирования земной коры и мантии [3]. Достаточно интенсивный период развития переживают пассивные методы сейсмологии, основанные на использовании естественного микросейсмического фона в качестве источника полезного сигнала, который в основном сформирован именно волнами поверхностного типа [11]. При этом обычно анализируются кинематические параметры волнового процесса, что обусловлено в первую очередь высокой точностью сейсмических приборов при измерении фазы, а точнее фазовой задержки между сигналами на двух разнесенных сейсмометрах [16]. На точность определения амплитуды поверхностных волн оказывает влияние целый ряд факторов, среди которых частотная характеристика чувствительности сейсмоприемника и условия его установки.

Рассмотрим два известных метода исследования глубинного строения геофизической среды, использующих в качестве основного измеряемого

параметра амплитуду волн поверхностного типа: метод низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ) [2] и метод спектрального отношения горизонтальной к вертикальной компоненте (Н/V) [9]. В методе микросейсмического зондирования анализируется пространственное распределение спектрального отношения амплитуды вертикальной компоненты колебательной скорости микросейсмического шума в точке наблюдения и на удаленной опорной станции. В методе Н/V достаточно лишь одной станции, для которой изучается поляризация упругих волн, вызванных сейсмическими источниками или микросейсмическим шумом, в спектральной области. Оба метода на сегодняшний день достаточно популярны, поскольку позволяют с минимальными трудовыми затратами получать качественную оценку скоростных характеристик слоистой геофизической среды, однако их теоретическое обоснование до сих пор не получило должного развития [6]. Целью настоящей работы является изучение параметров волнового процесса, используемых в перечисленных амплитудных методах, на примере горизонтально-слоистой модели неоднородной среды.

СЛОЙ НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Наиболее простой моделью позволяющей изучить интересующие параметры волн поверхностного типа является изотропное упругое полупространство, покрытое изотропным упругим слоем. В этом случае решение уравнений теории упруго-

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

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

сти удобно искать с помощью Фурье-разложения потенциалов в виде убывающей по глубине z и бегущей в горизонтальном направлении x волны. Записывая граничные условия: равенства нулю напряжений на свободной поверхности и непрерывности смещений и напряжений на контакте слоя с полупространством, получим систему из шести алгебраических уравнений для определения коэффициентов разложения, выписанную, например, в работе [1]. Однородная система уравнений такого типа имеет нетривиальное решение, если ее определитель равен нулю. В общем случае получается бесконечное число решений, линейно связанных между собой, что не позволяет выписать компактные аналитические выражения для дисперсионного уравнения и итоговые результаты для полей смещений [5]. По этой причине дальнейший анализ системы уравнений выполнялся численно с использованием стандартных процедур линейной алгебры, реализованных в программном пакете MATLAB. Зависимость от горизонтальной координаты не учитывается, поскольку в модели рассматривается однородная по горизонтали среда. Кроме того, не учитывается и временная зависимость. Таким образом, численно определялись горизонтальные $U_x(z)$ и вертикальные $U_z(z)$ смещения, зависящие только от глубины расположения приемника и параметров модели среды. Так как амплитуды смещений известны с точностью до произвольного постоянного коэффициента, то во всех последующих расчетах используется нормированное на $\int U(z)dz$ значение, что позволяет учесть изменения в амплитуде волнового процесса, происходящие в результате перераспределения энергии по глубине.

В качестве исходной модели геофизической среды была выбрана скоростная модель Земли PREM [7]. На первом этапе исследования в модели был выделен один слой, соответствующий по нижней границе поверхности Мохоровичича, параметры слоя приняты равными усредненным по 24.5 км скоростям продольных волн $c_l' = 6.181$ км/с, скоростям поперечных волн $c_t' = 3.467$ км/с и плотностям $\rho' = 2.714$ г/см³, свойства полупространства соответствуют усредненным по следующему 24.5 км скоростям продольных волн $c_l = 8.047$ км/с, скоростям поперечных волн $c_t = 4.530$ км/с и плотностям $\rho = 3.333$ г/см³.

ОТНОШЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ К ВЕРТИКАЛЬНОЙ (H/V)

В методе H/V характеристикой среды является отношение $U_z(z=0)/U_x(z=0)$, которое описывает “эллиптичность”, то есть поляризацию поверхностной волны Рэлея. Отметим, однако, что H/V не всегда интерпретируется в духе поверхностных

волн Рэлея; существуют также подходы, основанные на моделировании объемных волн и поверхностных волн типа Лява, но при этом в качестве источника колебаний рассматривается не фоновый микросейсмический шум, а землетрясения, микротремор или искусственные сигналы. На рис. 1а представлено семейство кривых отношения H/V для двухслойной модели PREM при изменениях свойств материала слоя. Видно, что метод наиболее чувствителен к вариациям скорости поперечных волн; при этом положения максимума и минимума отношения практически не изменяются. Следовательно, наблюдаемая доминантная частота [4] определяется в основном толщиной слоя. На рис. 2 черным цветом приведена зависимость положения максимума отношения H/V от толщины слоя. Так же на рис. 2 приведена теоретическая зависимость толщины слоя от частоты (черный пунктир), предложенная в работе [9] вида $h = 0.25c_t'/f_0$. Отметим, что она не совпадает с данными моделирования, поскольку коэффициент 0.25 не является константой, а зависит от контраста скоростей поперечных волн на границе.

МЕТОД НИЗКОЧАСТОТНОГО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Следуя стандартному подходу к измерениям в методе микросейсмического зондирования [2] характеристикой среды является относительная интенсивность микросейсмических шумов в частотной области, которая определяется как $I = 10\lg(U_z(z=0)/U_{z0}(z=0))^2$, где U_{z0} — амплитуда вертикальных колебаний на некоторой опорной точке измерений. Для моделирования эффекта, используемого в ММЗ, вычислялась амплитуда вертикальной компоненты U_{z0} поверхностной волны Рэлея в опорной модели PREM и та же величина в возмущенной (исследуемой) модели U_z . Причем возмущению подлежали три параметра материала слоя: c_l' , c_t' , ρ' (обозначения 1–5 на рис. 1). На рис. 1б приведен спектр относительной интенсивности для возмущенной модели слоистой геофизической среды, относительно модели PREM. Интересно отметить, что доминантная частота спектра ММЗ отличается от доминантной частоты в методе H/V. Видно, что наибольшее влияние на относительную интенсивность поверхностной волны Рэлея оказывает скорость поперечных волн. На рис. 2 серым цветом показана зависимость доминантной частоты в ММЗ от глубины границы слоя относительно модели PREM. Также на рис. 2 показана эмпирическая зависимость глубины от длины зондирующей волны (серый пунктир), используемая в [2] и равная $h = \lambda/4$. Отметим, что если отличия опорной

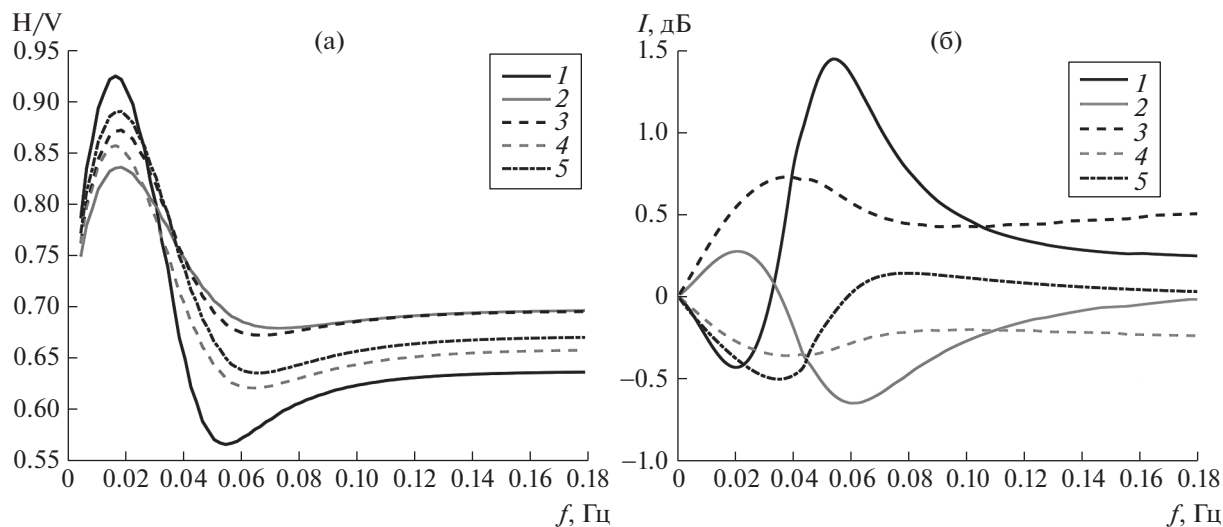


Рис. 1. Результаты расчета параметров N/V (а) и $MM3$ (б) в модели среды в виде полупространства со слоем для различных параметров слоя: скорость поперечных волн $c_t' - 0.4$ км/с (1) и $c_t' + 0.25$ км/с (2); скорость продольных волн $c_l' - 0.4$ км/с (3) и $c_l' + 0.25$ км/с (4); плотность $\rho' - 0.31$ г/см³ (5); где $c_t' = 3.467$ км/с, $c_l' = 6.181$ км/с и $\rho' = 2.714$ г/см³.

и исследуемой моделей не только в глубине границы слоя, но и, например, в скорости поперечных волн, то на положение спектрального максимума оказывают влияние два конкурирующих эффекта — увеличение относительной интенсивности поверхностной волны Рэлея, при понижении скорости в слое, и уменьшение относительной интенсивности при уменьшении толщины слоя. В результате, зависимость глубины от частоты в $MM3$ может иметь крайне сложный вид, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

В заключении отметим, что природа микросейсмических шумов, сформированных волнами поверхностного типа, связана не только и не столько с типом источников микросейсм (морские волны, атмосферные вихри и ветры), но и со структурой самой среды распространения — Земли. Так, например микросейсмсы первого рода с периодом около 16 с, вносящие основной вклад в фоновое микросейсмическое поле на Земле могут быть описаны, следуя рис. 2, в рамках простой модели в виде упругого слоя на упругом полупространстве с толщиной слоя порядка 10 км.

МНОГОСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Для моделирования поверхностных волн рэлеевского типа в неоднородной среде, включающей достаточно большое количество горизонтальных слоев, была разработана программа в пакете MATLAB, реализующая модифицированный алгоритм матричного пропагатора [10]. Суть алгоритма заключается в последовательном добавлении слоев, граничные условия на которых одина-

ковы по форме и отличаются лишь величиной параметров. Программа выполняется в два этапа: сначала отыскиваются собственные значения дифференциального оператора задачи на $P-SV$ -колебания в слоистой среде — то есть частотозависимые фазовые скорости, затем в найденных точках вычисляются собственные функции [3]. Для контроля ошибок было выполнено сопоставление результатов выполнения программы с полуаналитическим решением для упругого слоя на

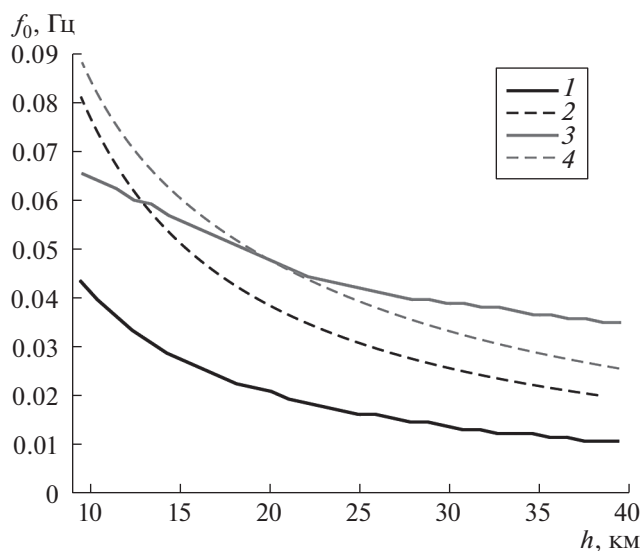


Рис. 2. Зависимость доминантной частоты от толщины слоя. 1 — результаты моделирования N/V ; 2 — теоретическая зависимость N/V ; 3 — результаты моделирования $MM3$; 4 — эмпирическая зависимость $MM3$.

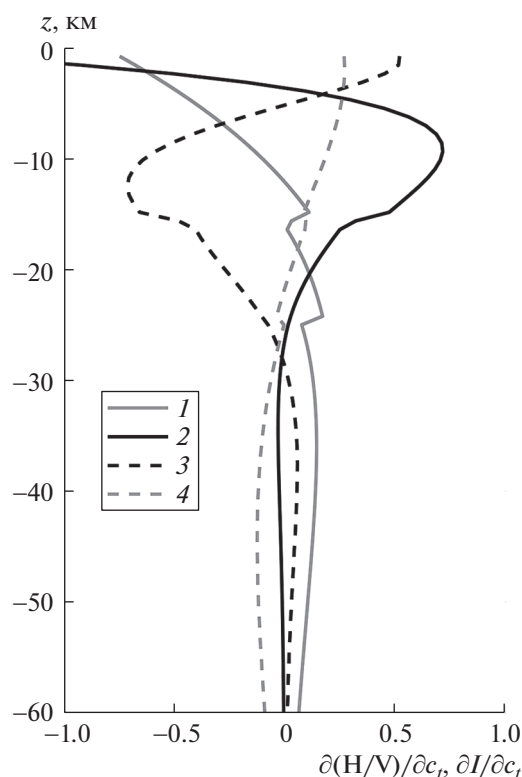


Рис. 3. Нормированные кривые чувствительности методов H/V (сплошные линии) и ММЗ (пунктирные линии) к скоростям поперечных волн в слоях, расположенных на различной глубине в рамках модели PREM при заданных частотах 1, 4 – 0.025 Гц; 2, 3 – 0.068 Гц.

полупространстве, описанным в начале работы. Кроме того, точность результатов моделирования многослойной среды была проверена путем сравнения с известной программой [8].

Представляет интерес численная оценка частной производной эллиптичности (отношения H/V) и относительной интенсивности поверхностной волны Рэлея по скорости поперечных волн, изменяющейся с глубиной. Для этого оригинальная модель PREM до глубины 100 км была разделена на 128 однородных слоев, с шагом 0.78 км и в рамках такой модели рассчитывались эллиптичность H/V и относительная интенсивность I . Затем в каждый из слоев последовательно вносилось возмущение скорости поперечных волн c_r , равное 0.01 км/с, и вычисления повторялись. В результате была получена зависимость чувствительности методов H/V и ММЗ к вариациям параметров среды, расположенных на различной глубине (рис. 3). Представленные на рис. 3 кривые чувствительности позволяют перейти от качественной интерпретации результатов H/V и ММЗ, используемой в настоящее время, к количественной. Причем кривые, в зависимости от метода,

различаются знаком практически на всех глубинах, а максимум чувствительности расположен на различной глубине, что указывает на независимость двух обсуждаемых параметров. Путем решения обратной задачи возможно по наблюдаемым экспериментальным данным восстановить математическую модель слоистой среды (скорости продольных и поперечных волн, плотности) наилучшим образом описывающую эксперимент. Несмотря на явные преимущества такого подхода, которые заключаются в возможности оценки значений абсолютных параметров материала, из которого формируется слоистая модель, он не лишен недостатков. В частности, по сравнению со стандартной интерпретацией ММЗ, при слоистой аппроксимации накладывается ограничение на горизонтальную разрешающую способность метода. В заключении отметим, что сам способ решения обратной задачи требует дополнительного исследования с анализом единственности, сходимости и устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в пассивных сейсмических исследованиях одновременное применение двух обсуждаемых амплитудных методов позволит повысить достоверность результатов исследования глубинного строения геофизической среды. Представляется целесообразным дополнительно включать в исходные данные и результаты измерений скоростей поверхностных волн, используя, таким образом, всю доступную информацию о волновом поле. При этом итоговая слоистая модель строится в рамках единого подхода, с использованием трех независимых источников информации. Полученные результаты позволяют решать обратную задачу для методов H/V и ММЗ в двумерном случае. При этом в трехмерной постановке задачи нужно также учитывать эффекты геометрического расхождения, рефракции, фокусировки/дефокусировки и затухания. По всей видимости, в среде с достаточно медленным изменением свойств в горизонтальном направлении, эффекты, описанные в настоящей работе, будут иметь первостепенное значение и в трехмерной модели.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18–35–00541).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Сильно неоднородные звуковые поверхностные волны в твердых телах // Акустический журнал. 1978. Т. 24. № 5. С. 780–782.

2. Горбати́ков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Изучение возможностей метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2011. № 4. С. 96–112.
3. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1987. 279 с.
4. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов. М.: Недра. 1996. 448 с.
5. Разин А.В. Собисевич А.Л. Геоакустика слоистых сред. М.: ИФЗ РАН, 2012. 210 с.
6. Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 18–23.
7. Dziewonski A., Anderson D. Preliminary Reference Earth Model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981. V. 25. P. 297–356.
8. Herrmann R.B. Computer Programs in Seismology: An Evolving Tool for Instruction and Research // *Seismological Research Letters*. 2013. V. 84. № 6. P. 1081–1088.
9. Malischewsky P., Scherbaum F. Love's Formula and H/V-ratio (Ellipticity) of Rayleigh Waves // *Wave Motion*. 2004. V. 40. № 1. P. 57–67.
10. Menke W. Comment on "Dispersion Function Computations for Unlimited Frequency Values" by Anas Abo-Zena" // *Geophysical Journal International*. 1979. V. 59. № 2. P. 315–323.
11. Nakata N., Gualtieri L., Fichtner A. Seismic Ambient Noise. Cambridge University Press. Cambridge. UK, 2019. 344 p.
12. Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. Model of the Geoacoustic Tomography Based on Surface-type Waves // *Physics of Wave Phenomena*. 2016. V. 24. № 3. P. 249–254.

ON THE SOLUTION OF DIRECT PROBLEM FOR RAYLEIGH-TYPE WAVES PARAMETERS IN LAYERED GEOPHYSICAL MEDIUM

Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich^a and D. A. Presnov^{a, #}

^a *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: presnov@physics.msu.ru*

The patterns of elastic surface waves propagation in a layered geophysical medium, which can be used in the search for buried inhomogeneities, are studied. Relationship for the main informative parameters in the known surface-wave amplitude methods of seismic exploration are established based on numerical modeling. The results of calculating the sensitivity curves of ellipticity and the relative amplitude of surface waves to variations in the velocity of shear waves in layers located at different depths are presented.

Keywords: surface wave, Rayleigh wave, layered medium, mathematical modeling, MSM, H/V, dominant frequency