

КОНТРОЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА НЕЛИНЕЙНОСТИ ВЕРХНИХ ТОЛЩ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ВАРИАЦИЯМ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

И.А. Маслов

Получены оценки возможности контроля изменчивости характеристик горной среды по трассе распространения упругих волн.

Зависимость скорости упругих волн в Земле от напряженного состояния среды является нелинейной. В соответствии с [1] ее можно представить в виде

$$\rho V_p^2 = \lambda + 2\mu - P,$$

где V_p — скорость плоской волны сжатия; P — гидростатическое давление; ρ — плотность среды; λ и μ — постоянные Лямэ, в общем случае зависящие от P .

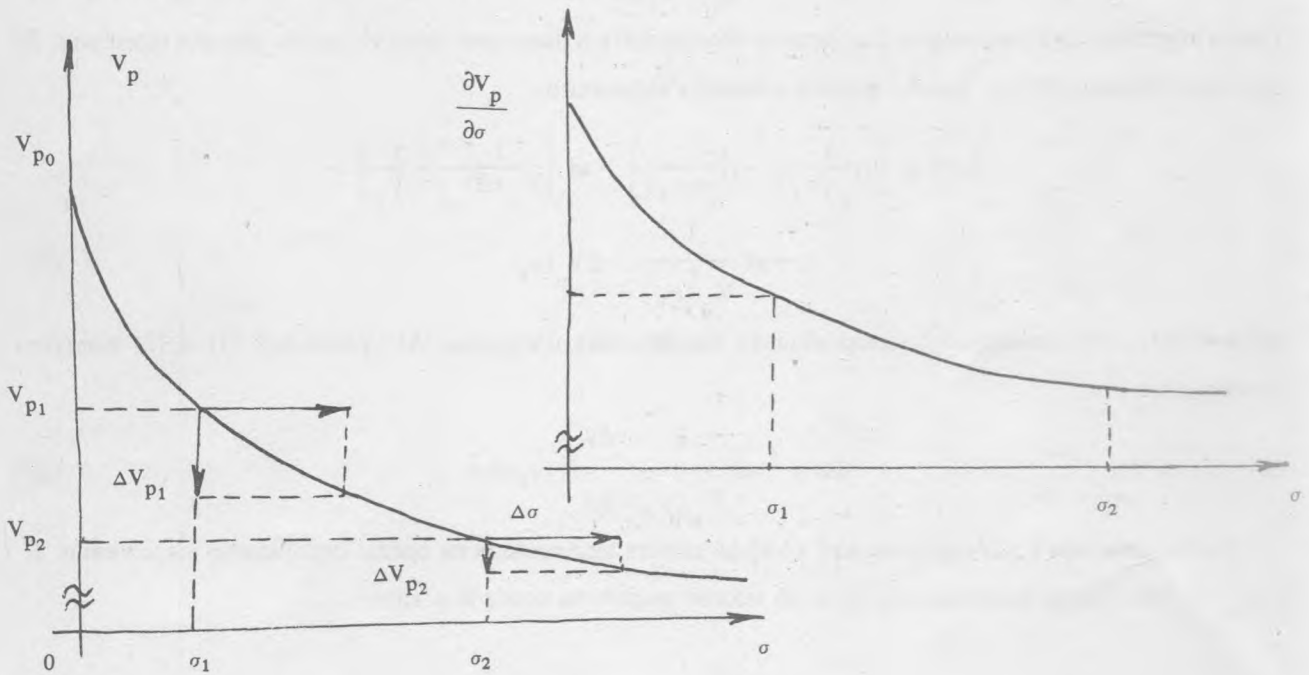


Рис. 1. Зависимость скорости волны сжатия от упругого напряжения.

Рис. 2. Зависимость производной скорости волны сжатия по напряжению от упругого напряжения.

Обозначив составляющую тензора напряжений σ , можно записать

$$\Delta V_p(\sigma) = \frac{\partial V_p}{\partial \sigma}(\sigma) \Delta \sigma. \quad (1)$$

На рис. 1 и 2 показана схематическая зависимость V_p и $\partial V_p / \partial \sigma$ от упругого напряжения σ . Из приведенных кривых видно, что V_p и $\partial V_p / \partial \sigma$ зависят от величины исходных напряжений σ . Предположим, что в исследуемой области созданы стационарные, гармонические высокостабильные волновые поля (объемных и поверхностных волн), распространяющиеся от источника до приемника. Если в среде по трассе распространения, например, волны сжатия будет создана область изменения напряженного состояния ($\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta \sigma_1$), то время пробега волны между источником и приемником изменится на величину τ по сравнению с временем пробега в исходном состоянии с $\sigma = \sigma_0$.

Для монохроматического волнового колебания с периодом колебаний T удобно перейти от измерений времени к измерениям разности фаз принятой и испущенной волны:

$$\Delta \varphi = 2\pi \tau / T.$$

Таким образом, зная величину $\Delta \varphi$, можно обнаружить изменение свойств среды распространения. В рассматриваемом случае для $\Delta \varphi$ можно написать выражение:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \omega l \left[\frac{1}{V_p(\sigma_1)} - \frac{1}{V_p(\sigma_0)} \right] = \omega l \left[\frac{1}{V_p + \Delta V_p} - \frac{1}{V_p} \right] \approx \\ &\approx -\omega l \frac{1}{V_p(\sigma_0)} \cdot \Delta V_p(\sigma_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi/T$, l — линейный размер области приложения нагрузки. Из уравнений (1) и (2) следует зависимость

$$\Delta \varphi \approx -\omega l \frac{1}{V_p(\sigma_0)} \frac{\partial V_p}{\partial \sigma}(\sigma_0) \Delta \sigma. \quad (3)$$

В соответствии с /2/ примем для коэффициента нелинейности среды следующее выражение: $K = \rho V_p \Delta V_p / \Delta P$. Тогда зависимость $\Delta \varphi$ в (3) можно выразить через K в виде

$$\Delta \varphi = -\frac{\omega l}{\rho} \frac{1}{V_p^3(\sigma_0)} K \Delta \sigma. \quad (4)$$

Оценим порядок величин, входящих в выражение для $\Delta \varphi$. В соответствии с оценками /3/, на глубине 1000 м при сосредоточенном усилии 10^{-7} Н, $V_p = 2000$ м·с⁻¹, $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг·м⁻³ давление составит 100 Па.

По данным /4/ нижняя граница сейсморазведочных частот лежит в пределах 10 — 25 Гц, а верхняя — зависит от поглощения и на глубинах до 1000 м допускает работу на частотах до 100 Гц, а на глубинах до 3000 м — не выше 60 Гц.

Величина коэффициента нелинейности K меняется от $10^2 — 10^4$ /5/ до $\sim 100 — 200$ /6/.

Размер l зоны нагружения на поверхности можно принять в соответствии с /6/ порядка 5-7 м.

Подставляя в (4) значения $\omega = 2\pi f$, $f = 10$ Гц, $l = 5$ м, $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, $V_p = 2 \cdot 10^3$ м·с⁻¹, $\Delta\sigma = 100$ Па, получим зависимость $\Delta\varphi$ от K в виде $\Delta\varphi = 2 \cdot 10^{-9} K$.

Известен акустический метод диагностики нелинейно-упругого параметра геологических сред /8/, в котором излучатель и приемник акустических волн располагаются в соседних скважинах, небольшой сейсмический вибратор — на поверхности, а в процессе эксперимента измеряется индекс фазовой модуляции акустической волны под воздействием низкочастотной вибрации. Эта величина зависит от распределения нелинейно-упругого параметра среды между скважинами.

Мобильным, не требующим бурения скважин, позволяющим использовать более низкие частоты измерительной волны и поэтому охватывающим большие глубины, может служить способ измерения девиации фазы сейсмоакустической волны с помощью объемно-резонансной волновой антенны. Волновая антенна основана на создании в среде стационарного гармонического волнового поля, стабилизированного с помощью цепи обратной связи приемник-генератор, и измеряет девиации фазы, обусловленные изменениями скорости волны, в частности, в результате приложения к среде поверхностной или внутренней нагрузки. Описание подобной антенны и результаты экспериментов с ее макетом приведены в /9/.

Поскольку современная точность фазовых измерений достигает $\Delta\varphi/\varphi \sim 10^{-8}$, то уже при величине $K = 5$ может быть достигнут, в отсутствие помех, обнаружимый эффект изменения скорости распространения упругих волн.

Приведенные оценки являются минимальными, поскольку в настоящее время осуществимыми являются источники гармонических колебаний с амплитудой давления вблизи источника 10^5 Н/м² или силой 10^8 Н и диаметром штампа 10 — 30 м, что соответствует $l = 50 — 150$ м /7/.

Для проведения таких исследований можно использовать принцип объемно-резонансной волновой антенны /9/.

Напомним, что измеряя величину $\Delta\varphi$ и определяя параметры ω , l , V_p , ρ , мы получаем оценку не самого коэффициента нелинейности K , а произведения $K\Delta\sigma$, где величина $\Delta\sigma$ зависит не только от мощности источника, но и от свойств площадки его установки, связи источника с грунтом и т.п.

Однако параметр $K\Delta\sigma$ при стабильных условиях работы вибратора позволит оценить по исследуемой трассе такие характеристики горных пород, как неоднородность, трещиноватость,

пористость, дефекты структуры разного масштабного уровня, существенно влияющие на нелинейные свойства среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sawyers K.N. Bull. Seism. Soc. Am., **58**, №5, 1667 (1968).
2. Гущин В.В., Шалашов Г.М. В кн.: Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М., Наука, 1981, с. 144.
3. Гущин В.В., Заславский Ю.М. В кн.: Проблемы нелинейной сейсмологии. М., Наука, 1987, с. 260.
4. Хувер Г.М., Галлагер Дж.Г., Ригдон Х.К. Вибросейморазведка. ТИИЭР, т. 72, №10, 69 (1984).
5. Хаврошкин О.Б. В кн.: Проблемы нелинейной сейсмологии. М., Наука, 1987, с. 75.
6. Алешин А.С., Кузнецов В.В. Исследование физико-механических свойств рыхлого грунта под плитой вибратора. Там же, с. 267.
7. Гущин В.В., Шалашов Г.М. Оценка предельных параметров нелинейных сейсмических антенн. Там же, с. 257.
8. Беликович А.В. и др. Тезисы Всесоюзного семинара "Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре". Звенигород, 14-16 декабря 1989 г., с. 95.
9. Иноземцев А.Г., Маслов И.А. Препринт ИОФАН №84, М., 1989.

Институт общей физики РАН

Поступила в редакцию 14 мая 1992 г.