

А. М. ЕПИНАТЬЕВА, Е. В. КАРУС, М. В. НЕВСКИЙ

ПРИРОДА АНИЗОТРОПИИ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩАХ

(Представлено академиком М. А. Садовским 22 IV 1971)

Изучение анизотропии скоростей упругих волн в реальных средах представляет важное практическое значение при изучении разных диапазонов глубин земной коры и мантии Земли при помощи сейсмических методов сейсморазведки, глубинного сейсмического зондирования и сейсмологии. Данные об анизотропии скоростей необходимы для построения сейсмических моделей реальных сред, усовершенствования способов и уточнения результатов интерпретации сейсмических данных.

В настоящему времени проведено большое число экспериментов по изучению степени проявления и природы анизотропии на образцах различных горных пород в ультразвуковом диапазоне частот (10^4). Существенное проявление анизотропии скоростей в сейсморазведочном диапазоне частот (30—60 гц) установлено для осадочных толщ ($5-8$).

Согласно работам ($9-11$), наиболее вероятной причиной анизотропии скоростей сейсмических волн в осадочных средах является тонкая слоистость в распределении скоростей. Однако экспериментальных доказательств этого предположения до последнего времени не получено. Необходимость в таких доказательствах существует, поскольку строгие теоретические решения (9) даны лишь для простейших периодических моделей тонкослоистых сред.

В настоящем сообщении приводятся прямые экспериментальные доказательства наличия анизотропии скоростей в осадочных толщах в сейсмическом диапазоне частот и связи анизотропии с тонкой слоистостью в распределении скоростей.

Для изучения анизотропии в осадочных толщах были проведены комплексные сейсмоакустические эксперименты в одном из районов северо-восточного Припятиского прогиба. Исследования проведены на объектах двух типов: тонкослоистой толще, представленной чередованием пород различного литологического состава с сильной дифференциацией по скоростям в тонких прослоях (I) и однородной по литологическому составу толще (II). Конкретными объектами являлись толща, представленная переслаиванием каменной соли и песчано-глинистых пород, и толща однородной каменной соли.

Распределение скоростей по вертикальному направлению изучалось при помощи измерений в скважинах на ультразвуковых (у.з.к.) и сейсмических (с.к.) частотах. Результаты измерений в скважинах дополнены измерениями скоростей на образцах, в результате которых установлена слабая анизотропия скоростей в чистой соли. Природа этой анизотропии требует специального исследования; для дальнейшего важен лишь экспериментально установленный факт слабой анизотропии ($\kappa_p = 1,03-1,04$) в чистой соли.

Приводимые на рис. 1 скоростные разрезы по у.з.к. показывают существенное различие в строении двух типов объектов. Для объекта I типа (глубины от 630 до 750 м) ярко выражена тонкая слоистость в распределении скоростей. Скорости изменяются от 4600 м/сек в прослоях соли до 2400 м/сек в несолевых прослоях. Объект II типа (глубины 510—740 м)

представляет практически однородную по скоростям толщу. Скорости незначительно колеблются в пределах 4600—4750 м/сек.

По данным у.з.к. проведена оценка скоростей сейсмических волн в направлении, перпендикулярном слоистости ($v_{\perp p}$), и коэффициентов анизотропии (κ_p) для объектов I и II типа. Для подобной оценки скоростной разрез (I) аппроксимирован двухкомпонентной периодической тонкослойной средой. При этом использовались приближенные формулы для $v_{\perp p}$.

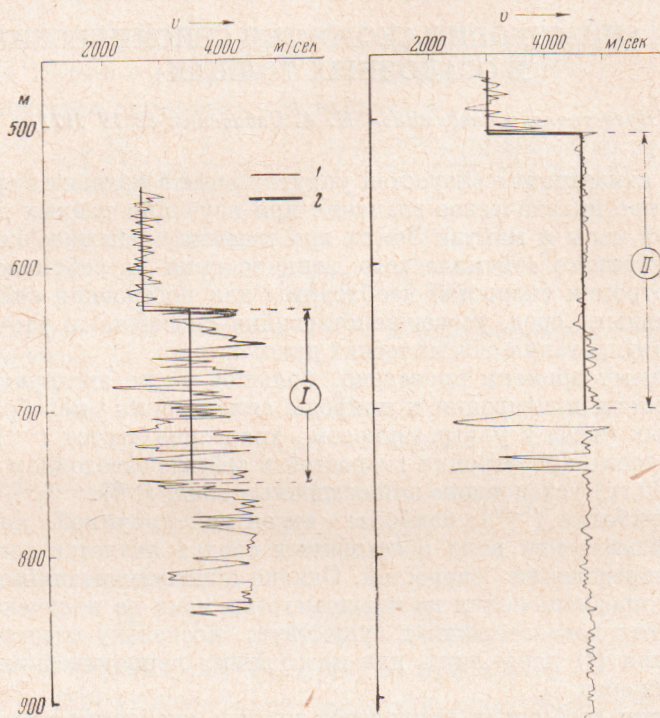


Рис. 1. Скоростные разрезы у.з.к. на объектах I и II типа.
1 — скорости по у.з.к., 2 — пластовые скорости

$v_{\perp p}$, $\kappa_p = v_{\parallel p} / v_{\perp p}$ в периодической двухкомпонентной тонкослойной среде, каждый из прослоев которой является анизотропным. Указанные формулы получены по способу Ю. В. Ризниченко ⁽¹⁰⁾ и имеют вид

$$v_{\perp p} = v_{1\perp p} (1 + m) [(m + 1/\delta)(m + \delta n_p^2)]^{-1/2}; \quad (1)$$

$$\kappa_p \cong \frac{\kappa_{1p}}{1 + m} \left[\left(1 + \frac{m}{\delta n_p^2} \right) \left(\frac{1}{a_p^2} + m \delta n_p^2 \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $m = h_1 / h_2$, $\delta = \rho_1 / \rho_2$, $a_p = \kappa_{1p} / \kappa_{2p}$, $n_p = v_{1\perp p} / v_{2\perp p}$, h_i , ρ_i , κ_{ip} , $v_{i\perp p}$ ($i = 1, 2$) — соответственно суммарные мощности прослоев первой и второй компонент в пределах пласта, плотности, коэффициенты анизотропии и скорости в направлении вкост слоистости в первой и второй компонентах разреза. Исходные параметры и результаты некоторых вариантов оценки $v_{\perp p}$ и κ_p для объекта I типа приведены в табл. 1. Скорости v_{ip} выбраны по данным у.з.к., κ_{ip} по измерениям на образцах, значение $\delta = \rho_1 / \rho_2$ принято равным единице из-за отсутствия уверенных данных о плотностях in situ. Значение параметра m определялось с использованием данных промысловых видов каротажа по стандартной методике.

Результаты оценки показывают, что для объекта I типа величины κ_p достигают 1,10 без учета анизотропии в чистой соли и 1,14 с учетом. Для

объекта II типа κ_p практически равно единице; отличие $v_{\perp p}$ и $v_{\parallel p}$ составляет 3—4% лишь при учете анизотропии в чистой соли.

Скорости продольных волн в сейсмическом диапазоне частот для различных направлений изучены при специальных наблюдениях по методике вертикального сейсмического профилирования. При этом приемники колебаний располагались на разных глубинах в пределах исследуемых толщ; источники колебаний находились вблизи поверхности земли на разных расстояниях от устья скважины, получены пластовые скорости в направлении, близком к вертикальному (рис. 1). Годографы первых вступлений проходящих волн при наблюдениях из удаленных пунктов взрыва использованы для определения скоростей по наклонным лучам. Сущность примененного при этом способа состоит в следующем. Пусть в двухслойной среде,

Таблица 1

$v_{\perp p}$, м/сек	n_p	m	κ_{1p}	κ_{2p}	$v_{\perp p}$, м/сек	κ_p
4600	1,530	0,90	1,00	1,00	3480	1,09
4600	1,530	0,80	1,04	1,00	3480	1,12
4600	1,530	1,00	1,00	1,00	3560	1,09
4600	1,530	1,00	1,04	1,00	3560	1,12
4600	1,585	1,00	1,00	1,00	3470	1,10
4600	1,585	1,00	1,04	1,00	3470	1,14

верхний из слоев которой является изотропным, а нижний поперечно-изотропный, известны скорость в первом слое v_1 и его мощность H . По вертикальному годографу первых вступлений проходящей волны при известном положении пункта взрыва, удаленного на некоторое расстояние x от устья скважины, требуется найти скорости по наклонным лучам во втором слое, т. е. $v_2(\theta)$. Задача определения $v_2(\theta)$ сводится к поиску истинной точки преломления луча на промежуточной границе. Предположим, что эта точка найдена, тогда $v_2(\theta_2)$ можно найти двумя путями:

1) по времени пробега проходящей волны t_H от источника до приемника, расположенного на глубине z :

$$\tilde{v}_2(\theta_2) = \frac{z - H}{\cos \theta_2 [t_H - H/(v_1 \cos \theta_1)]}; \quad (3)$$

2) исходя из закона Снеллиуса по углам падения и преломления лучей. Закон Снеллиуса для лучевых скоростей выполняется в рассматриваемом случае среды в форме

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2(\theta_2)}{\sin \theta_2} \left[1 - \left(\frac{d \ln v_2}{d\theta} \right) \operatorname{ctg} \theta_2 \right]^{-1}. \quad (4)$$

Поскольку в поперечно-изотропной среде $d \ln v / d\theta \rightarrow 0$ при $\theta \rightarrow \pi/2$, то начиная с некоторого значения θ , $\left| \frac{d \ln v_2}{d\theta} \operatorname{ctg} \theta_2 \right| \ll 1$ и точное уравнение (4) можно заменить приближенным:

$$v_1 / \sin \theta_1 \cong v_2(\theta_2) / \sin \theta_2, \quad (5)$$

откуда

$$\bar{v}_2(\theta_2) \cong v_1 \sin \theta_2 / \sin \theta_1. \quad (6)$$

Погрешность замены точной формулы (4) приближенной (5) при $\kappa_p \leq 1,10$ и $\theta \geq 60^\circ$ не превышает 4%.

Если значения скоростей, вычисленные по формулам (3) и (6), совпадают в пределах заданной точности, то точка преломления является истинной, а скорости $\bar{v}_2(\theta_2)$ и $\tilde{v}_2(\theta_2)$ дают с заданной погрешностью значение

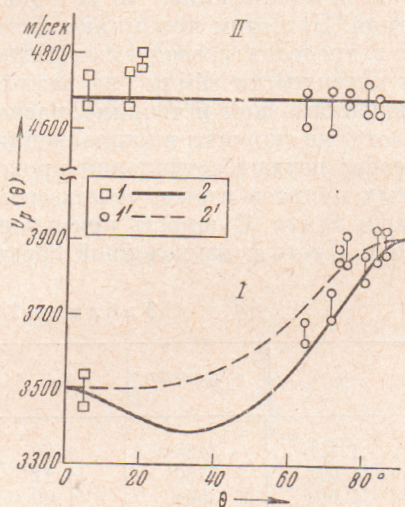


Рис. 2. Скорости сейсмических волн по наклонным лучам на объектах I и II типа. 1, 1' — экспериментальные данные, 2, 2' — теоретические кривые: $x = 50; 100$ (I); $650; 800$ (I'); θ — угол между вертикальной осью и направлением луча

лучевой скорости в направлении θ_2 . Если различие между скоростями превышает заданную погрешность, то процесс поиска точки преломления следует продолжить. В частности, его можно вести методом половинного деления отрезка границы между осью скважины и проекцией пункта взрыва на границу.

Описанный способ был применен для определения скоростей по различным направлениям на объектах I и II типа. В дополнение к сказанному, с помощью лучевых диаграмм учитывалась неоднородность к покрывающей толще. Результаты определения скоростей по наклонным лучам ($\theta = 63-85^\circ$) приведены на рис. 2. Для объекта I типа ($H = 630-750$ м), где по данным у.з.к. наблюдается ярко выраженная тонкая слоистость, скорости в направлениях, близких к горизонтальному, приблизительно на 400 м/сек превышают пластовую скорость (по вертикали) ($\kappa_p = 1,12$). На объекте II типа ($H = 510-700$ м) скорости по наклонным лучам практически совпадают с пластовой скоростью. На рис. 2 приведены

также теоретические индикатрисы лучевых скоростей, рассчитанные для периодической двухкомпонентной среды по формулам из работы ⁽¹²⁾ при некоторых параметрах, характерных для исследуемого разреза.

Совпадение результатов теоретической оценки значений $v_{\perp p}$ и κ_p (см. табл. 1) с данными измерений вполне удовлетворительное.

Таким образом, в условиях естественного залегания осадочных пород измерена анизотропия скоростей продольных волн и установлена ее связь с тонкой слоистостью в распределении скоростей. Полученные результаты доказывают применимость теории сейсмической квазианизотропии к реальным средам.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР
Москва

Поступило
5 IV 1971

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. И. Силаева, Е. И. Баюк, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 12 (1967); № 8 (1969).
- ² М. Ф. Скорикова, Упругие свойства горных пород южной части Сахалина и их использование в интерпретации геофизических наблюдений, «Наука», 1970.
- ³ K. Jida et al., J. Earth Sci. Nagoya Univ., 15, № 2 (1967).
- ⁴ W. H. Somerton et al., Proc. Second Congress of Intern. Soc. for Rock Mechanics, 1, Beograd, 1970.
- ⁵ A. H. Kleyn, Geophys. Prospecting, 4, № 1 (1956).
- ⁶ D. H. Vander Stoep, Geophys., 31, № 5 (1966).
- ⁷ Ph. Dunoier de Segonzac, J. Laherger, Geophys. Prospecting, 7, № 2 (1959).
- ⁸ R. H. Jolly, Geophys., 21, № 4 (1956).
- ⁹ С. М. Рытов, Акустич. журн., 2, в. 2 (1956).
- ¹⁰ Ю. В. Ризниченко, Изв. АН СССР, сер. географич. и геофизич., № 6 (1949).
- ¹¹ G. W. Postma, Geophys., 20, № 4 (1955).
- ¹² Ф. М. Ляховицкий, М. В. Невский, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 9 (1970).