

Ю. Ф. КОПНИЧЕВ

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ХВОСТОВОЙ ЧАСТИ СЕЙСМОГРАММЫ

(Представлено академиком М. А. Садовским 21 XI 1974)

В характеристиках кода-волн заключена информация как о параметрах очага землетрясения, так и о строении среды. Для извлечения ее необходимо знать механизм образования коды. В работе (1) предполагается, что кода местных землетрясений есть поверхностные волны, рассеянные на неоднородностях верхнего слоя коры. Понижение уровня коды с погружением сейсмоприемника (2) и анализ направлений подхода волновых групп (3) показывают, что хвостовую часть записи действительно формируют поверхностные волны, приходящие в точку приема с разных азимутов.

В данной работе рассматривается упрощенная статистическая модель рассеяния, в основу которой положены следующие предположения.

1) Падающие волны и рассеянные есть короткопериодные поверхностные волны одного типа.

2) Рассеиваются монохроматические волны с периодом T и средней фазовой скоростью в области рассеяния c .

3) Рассеяние однократное и изотропное.

4) Поле приповерхностных неоднородностей случайное и пространственно стационарное; преобладающий размер неоднородностей равен a и число их в единице площади n .

Из предположения 2) следует, что все рассеянные волны, зарегистрированные на сейсмограмме в момент t после начала излучения в очаге, прошли одинаковый путь

$$R=ct \geq \Delta,$$

где Δ — эпицентральное расстояние.

Неоднородности, на которых рассеялись эти волны, расположены по контуру эллипсу, в фокусах которого находятся эпицентр и станция. В полярных координатах уравнение данного эллипса имеет вид

$$r = (c^2 t^2 - \Delta^2) / 2(ct + \Delta \cos \varphi), \quad (1)$$

где r — расстояние от эпицентра (полюса) до неоднородности; эксцентриситет эллипса $e = \Delta / ct$.

Выберем отрезок времени $[t, t + \Delta t]$ такой, что $\Delta t > \tau$ (τ — длительность цуга регулярной волны, порождающей рассеянные). В этом интервале на сейсмограмме фиксируются волны, рассеянные в области S , ограниченной двумя эллипсами с эксцентриситетами $e_1 = \Delta / ct$ и $e_2 = \Delta / c(t + \Delta t)$ соответственно.

Согласно предположению 4), вторичные волны, рассеянные разными неоднородностями, статистически независимы, поэтому суммируются их энергии. Отсюда плотность энергии волн, зарегистрированных в указанном интервале на сейсмограмме,

$$J(t, \Delta t) = \sum_s J_n(t, \Delta t),$$

где J_n — плотность энергии волн, приходящих от отдельной неоднородности.

Поскольку в нашей модели рассматриваются поверхностные волны, то в отсутствие поглощения

$$J_n(t, \Delta t) = J_0 r_0 a \alpha / 2r(ct-r),$$

где J_0 — плотность энергии регулярной волны на референц-расстоянии r_0 от эпицентра, $a/2$ — референц-расстояние для рассеянных волн, $(ct-r)$ — расстояние от неоднородности до станции, α — отношение плотностей энергии в рассеянной и падающей волнах.

От неоднородностей, расположенных на элементарной площадке $\Delta S = r \Delta r \Delta \varphi$ внутри эллиптического кольца, в точку наблюдения приходят волны с плотностью энергии

$$\Delta J(t, \Delta t) = J_n n r \Delta r \Delta \varphi = J_0 n \alpha a r_0 \Delta r \Delta \varphi / 2(ct-r).$$

Суммируя по площади эллиптического кольца и переходя к пределу, получим

$$J(t, \Delta t) = \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \frac{J_0 n r_0 a \alpha dr d\varphi}{2(ct-r)},$$

где $\rho_1(\varphi) = (c^2 t^2 - \Delta^2) / 2(ct + \Delta \cos \varphi)$, $\rho_2(\varphi) = [c^2(t + \Delta t)^2 - \Delta^2] / 2[c(t + \Delta t) + \Delta \cos \varphi]$.

Переходя по формуле (1) к новым переменным t и φ и интегрируя, находим

$$J(t, \Delta t) = \pi J_0 n r_0 a \alpha \ln \left\{ \frac{1 + \varepsilon + [(1 + \varepsilon)^2 - e^2]^{1/2}}{1 + (1 - e^2)^{1/2}} \right\}, \quad \varepsilon = \Delta t / t. \quad (2)$$

Поскольку все волны, зарегистрированные в момент t , прошли одинаковый путь $R = ct$, для учета поглощения можно ввести в формулу (2) множитель $\exp(-2\pi t / QT)$:

$$J(t, \Delta t) = \pi J_0 n r_0 a \alpha \ln \left\{ \frac{1 + \varepsilon + [(1 + \varepsilon)^2 - e^2]^{1/2}}{1 + (1 - e^2)^{1/2}} \right\} \exp \left(-\frac{2\pi t}{QT} \right), \quad (3)$$

где Q — эффективная добротность среды.

Проанализируем формулу (3). При условии $2\varepsilon / (1 - e^2) \ll 1$

$$J(t, \Delta t) \simeq (\Delta t / t) (1 - e^2)^{-1/2} \exp(-2\pi t / QT). \quad (4)$$

Если $e \ll 1$, т. е. кода-волны прошли путь гораздо больший, чем эпицентральное расстояние, то выражение (4) переходит в формулу, аналогичную полученной в работе (1):

$$J_1(t, \Delta t) \simeq (\Delta t / t) \exp(-2\pi t / QT). \quad (5)$$

Следовательно, предложенная теория включает модель (1) как асимптотический случай: условие $e \ll 1$ выполняется для ближней зоны ($\Delta < 100$ км).

При $e \simeq 1$, что соответствует промежуточной зоне ($100 \text{ км} < \Delta < 3000 \text{ км}$), энергия рассеянных волн выше, чем в случае (5). Однако это отклонение невелико: так, например, $[J(t, \Delta t) / J_1(t, \Delta t)]^{1/2} < 1,3$ при $e = 0,8$.

Легко убедиться, что при условии $2\varepsilon / (1 - e^2) \simeq 1$ отклонение $J(t, \Delta t)$ от асимптоты (5) также очень невелико.

Отсюда следует, что огибающие коды — кривые, проведенные по максимальным амплитудам вдоль записи (4, 5), во всех случаях должны быстро выходить на асимптоту

$$A_1(t, \Delta t) \simeq (\Delta t / t)^{1/2} \exp(-\pi t / QT). \quad (6)$$

Таким образом, предложенная модель объясняет постоянство формы и уровня огибающих коды как в ближней (4), так и в промежуточной зоне (5).

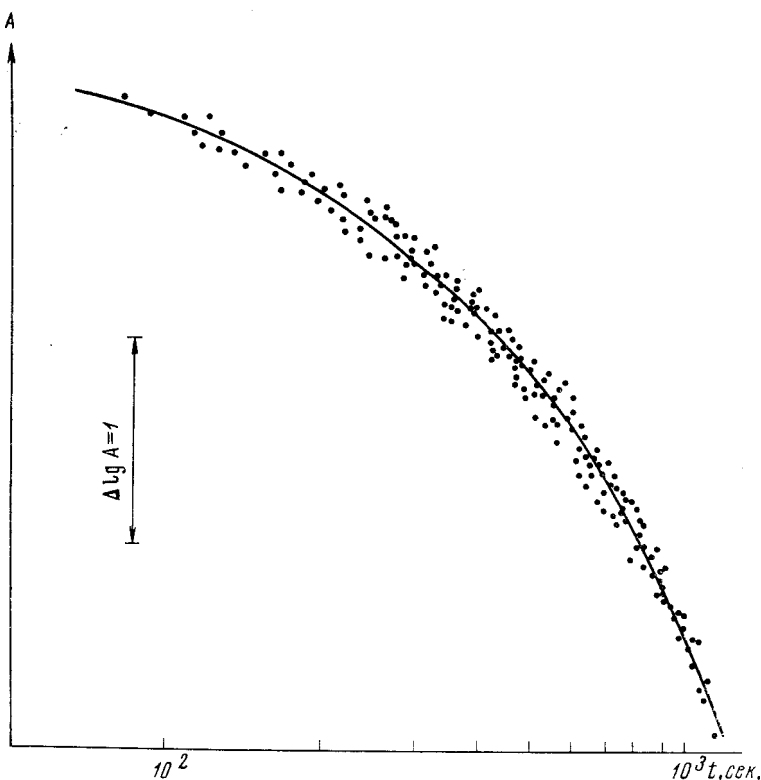


Рис. 1. Сводный график огибающих коды-волн Рэля. Индивидуальные огибающие совмещались при $e = \Delta / ct \leq 0,8$; $c = 2,7$ км/сек. Данные станций Талгар и Гарм; ЧИСС, фильтр $f = 0,5 - 0,8$ гц. Сплошная линия — теоретическая кривая (6), $Q = 400$, $T = 1,5$ сек

Для анализа соответствия формы общей огибающей коды (⁴, ⁵) асимптотической кривой (6) использовались записи ЧИСС-аппаратуры, вырезающей узкие полосы частот из спектра коды-волн.

На рис. 1 представлен сводный график огибающих коды-волн Рэля на эпицентральных расстояниях от 100 до 1800 км в пределах большого района, включающего Казахстан, Среднюю Азию и сопредельные территории Китая, Индии и Афганистана. Для сравнения приведена теоретическая кривая (6). Видно, что имеет место хорошее согласие теории с экспериментом. Следовательно, по затуханию коды можно определять эффективную добротность верхнего слоя коры в области распространения рассеянных волн. Размеры этой области можно оценить по формуле (1).

Автор выражает признательность И. Л. Нерсесову, Е. И. Гальперину и А. Е. Молчанову за ценные дискуссии.

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

Поступило
15 XI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. Аки, J. Geophys. Res., v. 74, № 2, 615 (1967). ² Е. И. Гальперин, Вертикальное сейсмическое профилирование, «Наука», 1971. ³ К. Аки, М. Tsujiura, Bull. Earth. Res. Inst., Tokyo Univ., v. 37, 207 (1959). ⁴ Г. А. Востриков, ДАН, т. 220, № 2 (1975). ⁵ И. Л. Нерсесов, Ю. Ф. Копничев, Г. А. Востриков, ДАН, т. 222, № 1 (1975). ⁶ К. К. Запольский, В. И. Халтурин, Тр. Ин-та физ. Земли АН СССР, № 9 (176), 138 (1960).