

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

N. S. Smirnova, On the computation of a wave field in a multilayer medium, *Zap. Nauchn. Sem. POMI*, 1995, Volume 230, 243–252

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.82

January 13, 2025, 12:37:15



Н. С. Смирнова

К ВОПРОСУ О ВЫЧИСЛЕНИИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ

Настоящая работа является продолжением серии статей [1-5], опубликованных в данном издании и касающихся расчетов теоретических сейсмограмм волн, распространяющихся в однородных слоисто-изотропных упругих средах с плоско-параллельными границами раздела. В предыдущих работах автора были разработаны подходы к вычислениям суммарных волновых полей, описаны алгоритмы расчета и приведены некоторые результаты вычислений. В данной работе дается еще один пример расчета теоретических сейсмограмм, который является достаточно интересным. На основе рассмотрения этого примера еще раз подтверждается факт существования в среде, содержащей внутри себя слой повышенной скорости, волн, имеющих параллельные годографы с кажущимися скоростями равными максимальной скорости продольных волн в среде. Кроме того, выясняется природа волн, входящих в состав волновых пакетов, наблюдающихся на сейсмограммах на небольших расстояниях r . На примере данного расчета анализируется волновое поле на разных расстояниях r от источника и показывается постепенная трансформация его записи, происходящая с увеличением расстояния r .

1. Пусть в цилиндрической системе координат (r, θ, z) задана упругая среда, состоящая из четырех слоев, лежащих на полупространстве и характеризующихся параметрами - скоростями распространения продольных и поперечных волн $v_p^{(\nu)}$ и $v_s^{(\nu)}$ и плотностями $\rho^{(\nu)}$ ($\nu = 1, 2, \dots, 5$), а также толщинами $h^{(\nu)}$ ($\nu = 1, \dots, 4$) (см. Табл. 1).

Будем предполагать, что источник типа нормальной силы с зависимостью от времени t , определяемой формулой (1) из работы [3], расположен в начале координат и включается в момент $t = 0$. Длительность воздействия T принимается равной 0.2 секунд. Задача осесимметрична и вычисляемое поле не зависит от координаты θ . Используя программу, составленную на основе изложенного в работах [1, 2, 5] алгоритма, представим результаты расчетов вертикальной v и горизонтальной u составляющих волнового поля в точках дневной поверхности на эпицентральных

расстояниях, лежащих в промежутке от 30 до 270 км (см. рис. 1-6).

Таблица 1

| Но слоев | Скорости v_p^i , км/с | Скорости v_s^i , км/с | Плотности ρ_i , г/см ³ | Толщины h_i , км |
|-------------|----------------------------|----------------------------|---|-----------------------|
| 1 | 5.4 | 3.0 | 2.3 | 1.0 |
| 2 | 5.8 | 3.2 | 2.4 | 1.0 |
| 3 | 6.0 | 3.4 | 2.6 | 3.7 |
| 4 | 6.2 | 3.7 | 2.8 | 1.0 |
| 5 | 6.05 | 3.65 | 2.65 | ∞ |

На расстоянии $r = 30$ км на сейсмограммах наблюдаются пакеты продольных и поперечных волн. Интенсивность пакета поперечных волн заметно превосходит интенсивность пакета продольных волн, как на записи горизонтальной u , так и вертикальной v составляющих. Кроме того, интенсивность волнового пакета продольных волн на записи вертикальной составляющей v незначительна по сравнению с интенсивностью волнового пакета поперечных волн. Возникновение этих пакетов объясняется интерференцией волн, распространяющихся в первом слое системы, который можно считать тонким слоем. Действительно, оказывается, что $\lambda_1 = v_1 T = 1,08 \sim h_1$, т.е. толщина первого слоя сравнима с длиной волны в этом слое.

Пакет продольных волн состоит из интерферирующих головных волн Γ_{2p_1} , Γ_{4p_1} , $\Gamma_{3p_1s_1}$, $\Gamma_{4p_12s_1}$, а также отраженных волн $2p_1$, $4p_1$, p_1s_1 . Пакет поперечных волн образован головными волнами Γ_{2s_1} , $\Gamma_{2s_14s_2}$, Γ_{4s_1} , Γ_{6s_1} , и отраженными волнами $2s_1$, $4s_1$, $6s_1$, $2s_12s_2$, $2s_14s_2$ и $4s_12s_2$. Впереди этого пакета заметна волна $\Gamma_{2s_13s_2}$, уже вышедшая из зоны интерференции. Заметим, что в состав волнового пакета поперечных волн входят волны, распространяющиеся как в первом, так и во втором слоях среды. Этот факт объясняется тем, что велики интенсивности этих волн, тогда как интенсивности аналогичных продольных волн незначительны. На всех последующих трассах ($r > 30$ км) волновой пакет поперечных волн не зарегистрирован, т.к. волны, входящие в него вступают на значительно больших временах, чем указанные на сейсмограммах.

Проследим поэтому изменения, которым подвергается интерференционный волновой пакет, состоящий из продольных и обменных

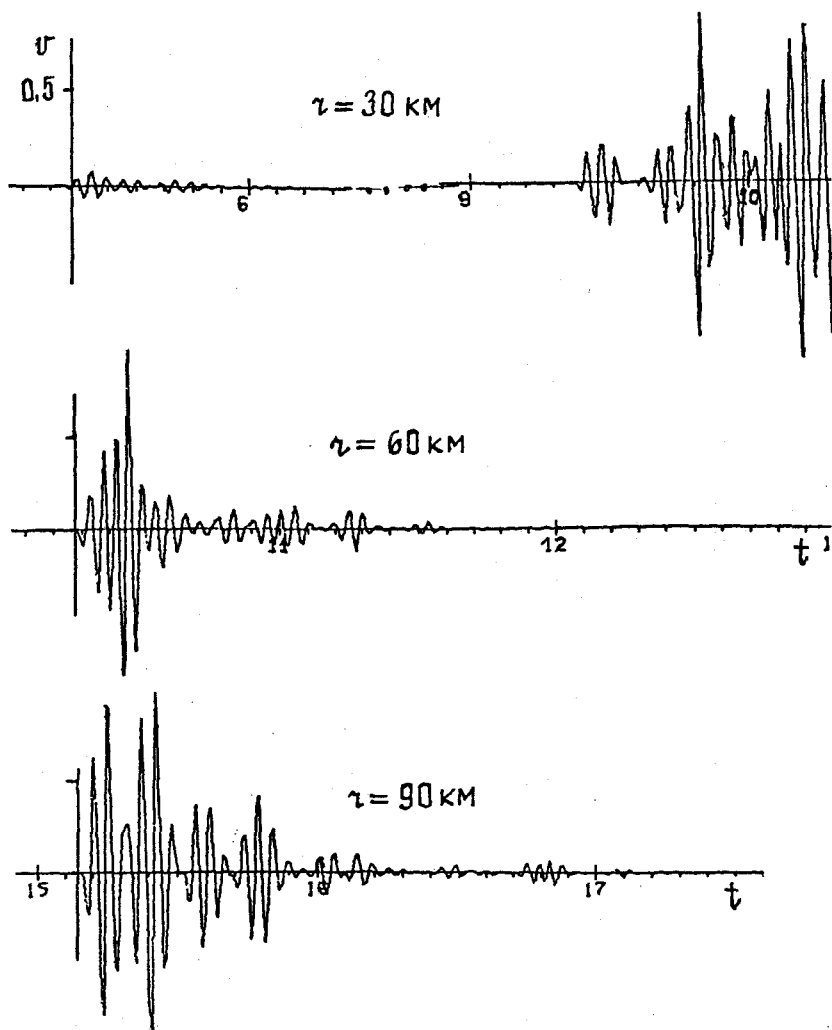


Рис. 1.

волн. С увеличением расстояния r заметно расширение пакета s , появление новых волн от более глубоких горизонтов, а также отдельно регистрируемых волн и новых волновых пакетов, формирующихся на основе равенства кажущихся скоростей. На расстоянии $r = 60 \text{ км}$ первые фазы пакета состоят из головных волн $\Gamma_{2p_1 2p_2}$, $\Gamma_{2p_1 4p_2}$, Γ_{2p_1} и Γ_{4p_1} , а также отраженных волн $2p_1 2p_2 2p_3 2p_4$, $2p_1 2p_2 2p_3$, $2p_1 2p_2$ и $2p_1 4p_2$. Отраженные волны $2p_1$, $4p_1$ и $6p_1$, на

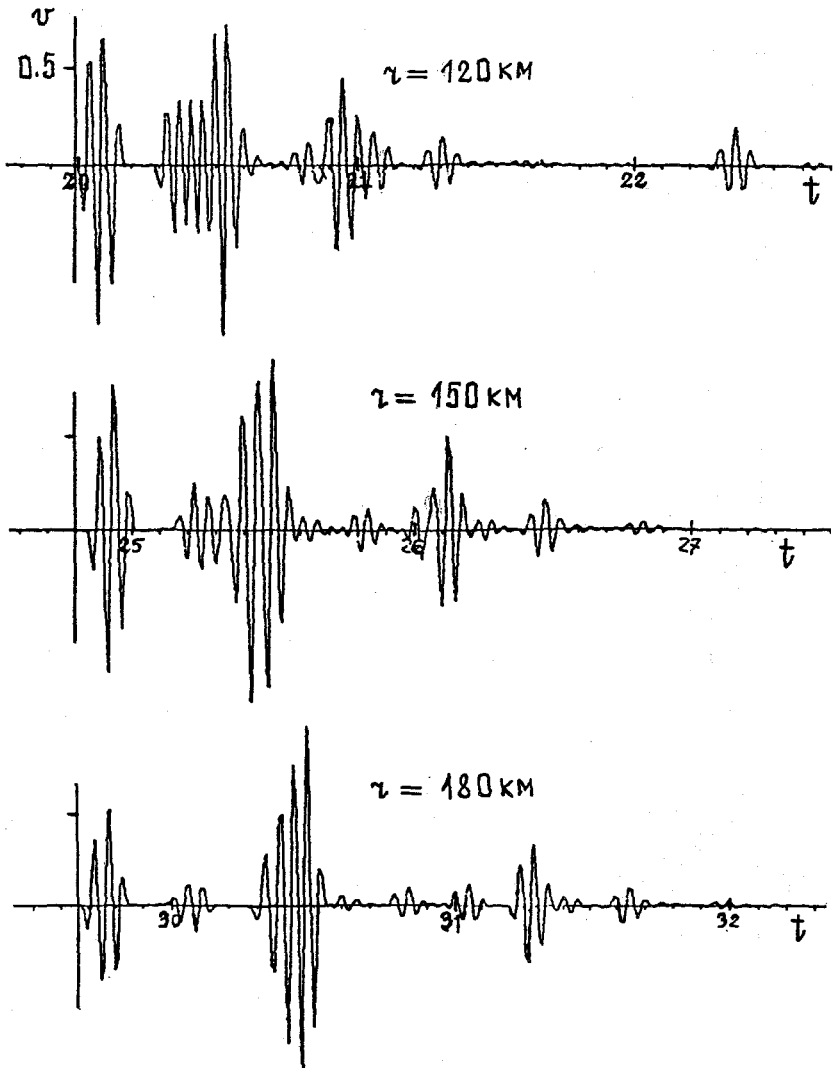


Рис. 2.

этом расстоянии образуют единую волну, которая четко видна на всех последующих трассах вплоть до $r = 150 \text{ км}$, когда эта волна начинает вступать при очень больших временах.

На дальнейших трассах ($r = 90$ и $r = 120 \text{ км}$) заметно постепенное разделение пакета на отдельные интерференционные группы, начиная с расстояния $r = 90 \text{ км}$ в первые вступления выходят волны $\Gamma_{2p_1 2p_2 2p_3}$ и $2p_1 2p_2 2p_3 2p_4$. Затем следует группа образован-

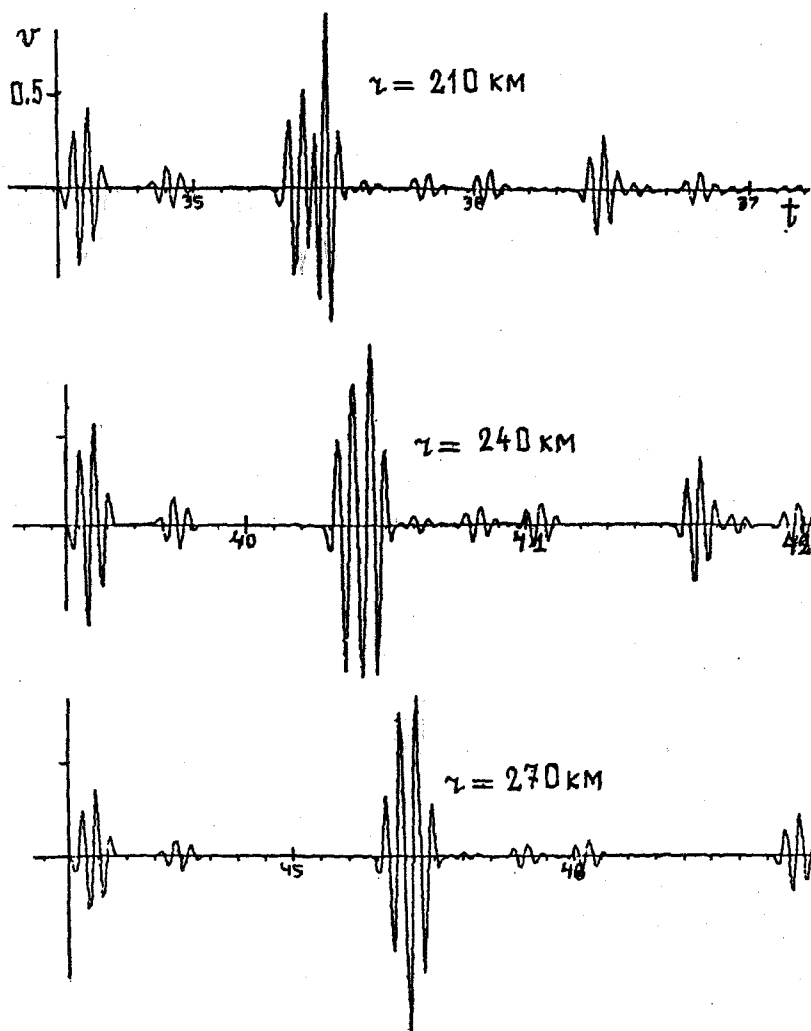


Рис. 3.

ная из головных волн $\Gamma_{2p_1 2p_2}$, $\Gamma_{2p_1 4p_2}$, $\Gamma_{4p_1 2p_2}$, $\Gamma_{4p_1 4p_2}$ и отраженной $2p_1 2p_2 2p_3$.

На расстояниях $r \geq 120$ км заметно появление единой интерференционной волны, состоящей из двух волн $\Gamma_{2p_1 2p_2 2p_3}$ и $2p_1 2p_2 2p_3 2p_4$ и выходящей в первые вступления. На расстоянии $r = 180$ км между этой волной и интерференционным пакетом, распространяющимся с кажущейся скоростью продольных волн в третьем слое,

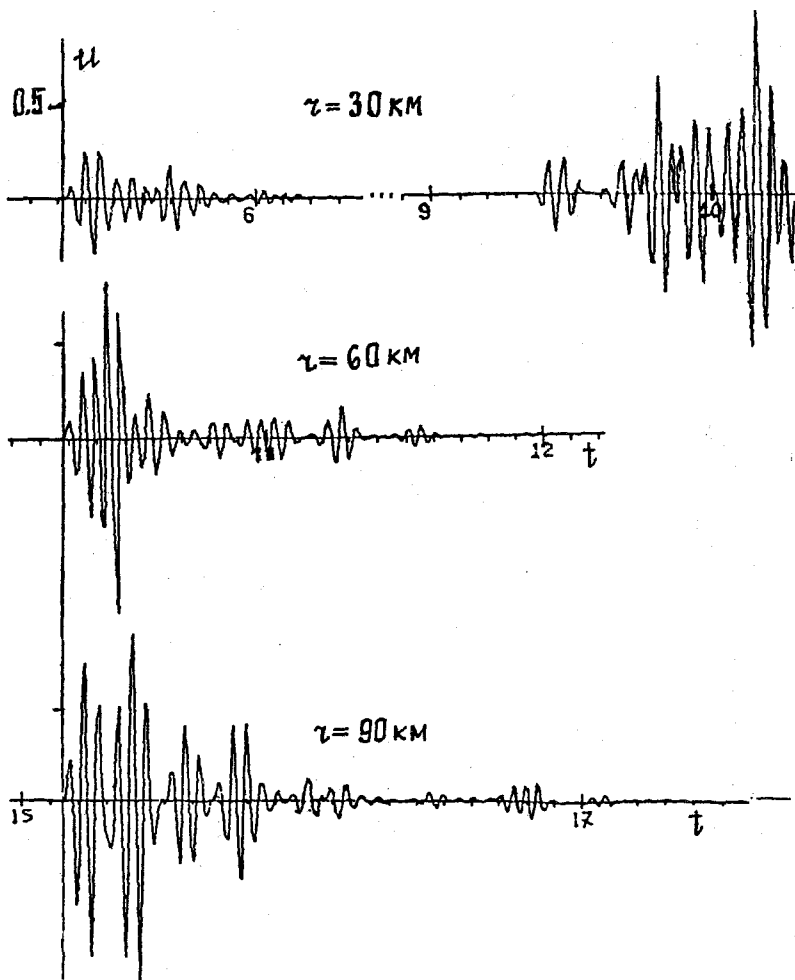


Рис. 4.

появляется волна $\Gamma_{2p_1 2p_2 4p_2}$, имеющая годограф, параллельный годографу волны $\Gamma_{2p_1 2p_2 2p_3}$. В данном примере только две волны на больших расстояниях r имеют параллельные годографы и распространяются с кажущимися скоростями, равными максимальной скорости продольных волн в среде. Этот факт объясняется недостаточным количеством кратных волн, выбранных для расчета.

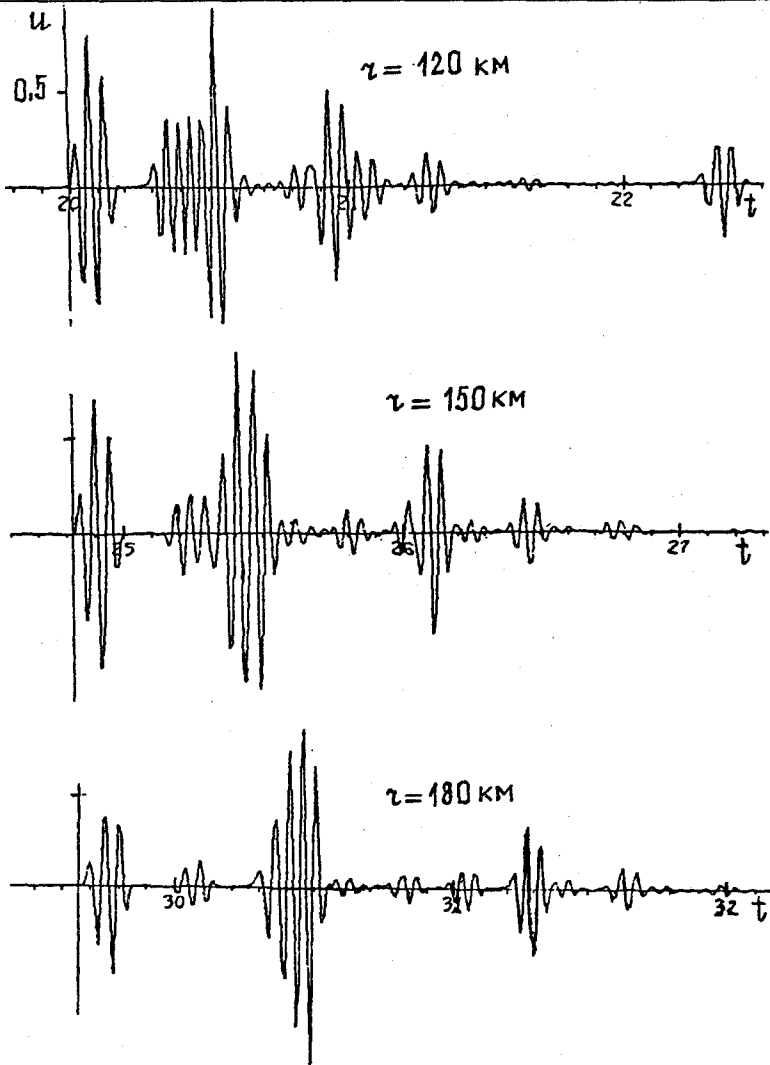


Рис. 5.

На больших расстояниях ($r = 210, 240$ и 270 км) запись почти стабильна и состоит из групп волн, каждая из которых распространяется со своей определенной кажущейся скоростью. За этими группами заметны отдельные не очень интенсивные волны имеющие кажущиеся скорости соответствующих распространяющихся впереди групп.

2. На основании рассмотренного примера можно сделать следу-

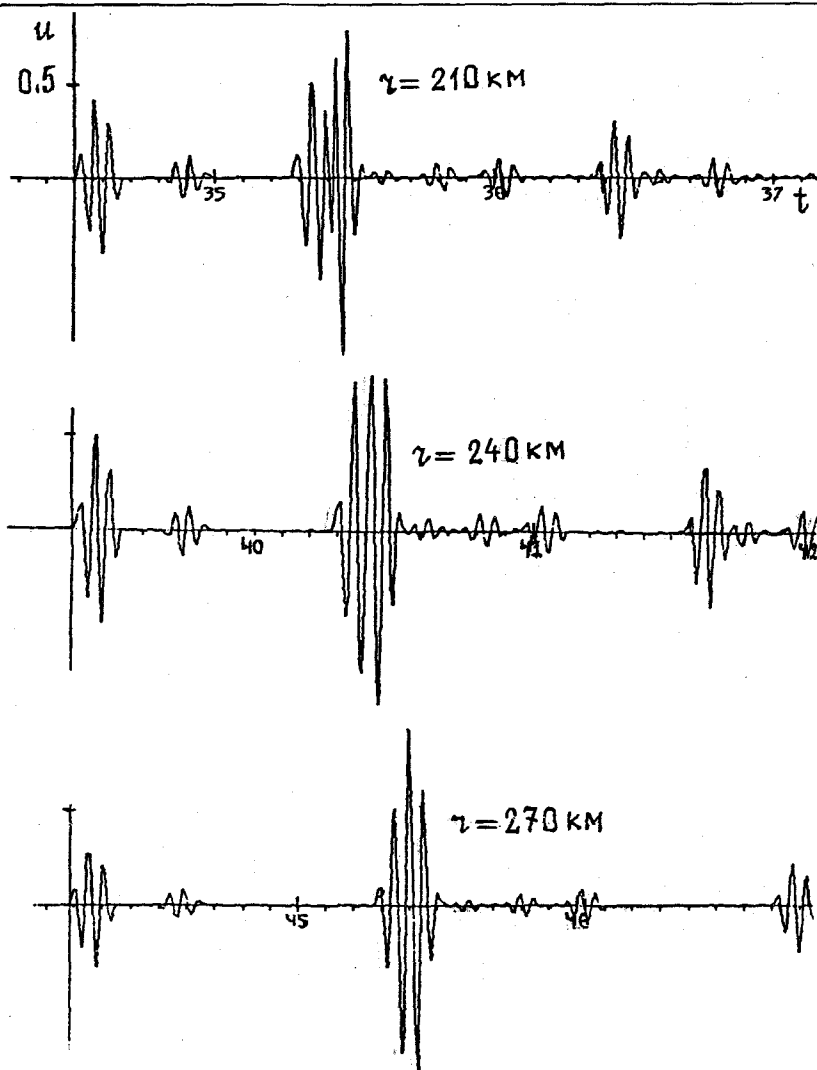


Рис. 6.

ющие выводы. Если при вычислении полей волн на расстояниях r сравнимых с общей толщиной H слоев среды (как это имело место в примерах из работы [3]) роль обменных волн существенна, то на расстояниях больших или много больших общей толщины слоев H обменные волны не дают большого вклада в общее волновое поле. На больших расстояниях r интерференционные волны состоят в основном из головных продольных и поперечных волн, причем по-

перечные волны значительно более интенсивны, чем продольные волны.

Процесс стабилизации сейсмическй записи наступает на достаточно больших расстояниях r по сравнению с суммарной толщиной H слоев упругой среды. В данном примере это достигается на расстояниях примерно равных 240 или 270 км при $H = 7$ км.

Однократно отраженные продольные (поперечные) волны приходят одновременно с головными волнами, у которых кажущиеся скорости распространения равны соответствующим кажущимся скоростям отраженных волн. Причем на больших расстояниях интенсивность однократно отраженной волны незначительна по сравнению с интенсивностью головной волны.

Если в упругой среде имеется слой с преобладающей скоростью, то в первые вступления выходит головная волна, распространяющаяся со скоростью в этом слое. В последующие вступления выходят кратные головные волны с теми же кажущимися скоростями. Если же при этом разности времен прихода двух соседних волн (головной и ее кратной) больше, чем время действия источника, то эти волны образуют систему достаточно заметных одиночных волн с параллельными годографами. И, наконец, на больших расстояниях r кратные отраженные продольные волны, распространяющиеся в тонком приповерхностном слое, на записе образуют единую интерференционную группу, наблюдающуюся в последующих вступлениях.

Остается добавить несколько слов относительно особенностей сейсмограмм, представленных на рисунках 1–6. Сейсмограммы для составляющих u и v для одинаковых расстояний r представлены на графиках в некотором относительном масштабе так, что наибольшая амплитуда имеет значение 1. Масштабные коэффициенты не приводятся на графиках. Вычисления проведены на машине БЭСМ-6 по программе, написанной на языке ФОРТРАН. Для расчета одной трассы затрачивалось примерно 12–13 минут машинного времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93–01–00480).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Смирнова, *Об одном алгоритме определения полей волн в многослойных упругих средах*. — Зап. научн. семин. ЛОМИ 186 (1990), 154–171.
2. Н. С. Смирнова, *Определение групп динамически эквивалентных волн при распространении в слоистых упругих средах*. — Зап. научн. семин. ЛОМИ 195 (1991), 154–160.

3. Н. С. Смирнова, *О расчете волновых полей в многослойных средах.* — Зап. научн. семин. ПОМИ 203 (1992), 156–165.
4. Н. С. Смирнова, *Алгоритм определения полей суммарных кратных волн при произвольном расположении источника и приемника внутри упругой среды.* — Зап. научн. семин. ПОМИ 210 (1994), 251–261.
5. Н. С. Смирнова, *Об условиях динамической эквивалентности волн в многослойных упругих средах.* — Зап. научн. семин. ПОМИ 218 (1994), 166–175.

Smirnova N. S. To the calculation of a wave field in a multilayered medium.

In the paper theoretical seismograms of waves propagating in an elastic medium consisting of four layers are given. The seismograms are computed by the method of summation of the kinematic and dynamic analogs of these waves. On the basis of these computations some conclusions are drawn on behavior of wave field at large distances.

С.-Петербургское отделение
Математического института
им. В. А. Стеклова

Поступило 14 сентября 1995 г.