

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ НЕФТИ И ГАЗА им. И.М.ГУБКИНА

Г.А. Карапетов

**Лабораторные работы
по курсу “Прямые и обратные задачи
в сейморазведке”**

Москва-1997

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ НЕФТИ И ГАЗА им. И.М.ГУБКИНА

Кафедра разведочной геофизики и компьютерных систем

Г.А. Карапетов

**Лабораторные работы
по курсу “Прямые и обратные задачи
в сейсморазведке”**

методические указания
для студентов специальности **080400** "Геофизические
методы поисков и разведки месторождений полезных ис-
копаемых"

Москва-1997

УДК 550.83

Г.А.Карпетов. Лабораторные работы по курсу “Прямые и обратные задачи в сейсморазведке”. М., ГАНГ, 1997. - с. 18.

Методические указания по лабораторным работам предназначены для студентов специальности **080400** специализаций “Разведочная геофизика ” и “Компьютерные системы и технологии”.

В них рассмотрены методы кинематического моделирования в слоистых средах с сосредоточенными параметрами, которые позволяют рассчитать синтетические сейсмограммы без учета кратных отражений.

Решение обратных задач осуществляется в рамках традиционно используемой в промышленности модели средних скоростей, однако примененные алгоритмы имеют ряд специфических особенностей обусловленных типом исходных данных.

Рекомендуется _____

© Государственная академия нефти и газа им. И.М.Губкина, 1997

Введение.

В сейсморазведке обычно приходится иметь дело со средами, характеризующимися существенными неоднородностями и неизвестным строением. Недоступность внутренних областей среды заставляет изучать ее внутрен-

ную структуру на основании поверхностных наблюдений, обработка которых позволяет получить некоторые усредненные или эффективные параметры, описывающие ее строение. Для лучшего понимания этого процесса, с одной стороны, используется прямое моделирование, дающее возможность в рамках некоторого приближения рассчитать параметры, характеризующего эту модель поля и сравнить его с наблюдаемым. С другой стороны, решение обратной задачи по модельным данным позволяет оценить точность определения параметров эффективной модели полученной в результате обработки.

В настоящее время такие работы в промышленности проводятся для трехмерных моделей с учетом динамики распространения волн. Алгоритмы решения подобных задач характеризуются значительной сложностью реализации, поэтому в рамках данного методического пособия будут рассмотрены лишь некоторые аспекты решения двухмерных задач распространения сейсмических волн в их кинематической постановке.

Работы представленные в рамках данного цикла являются взаимно увязанными по данным и расположены в порядке усложнения алгоритмов. Выполнение работ предусматривает наличие у студентов базовых знаний по программированию в объеме курса “Вычислительная математика и программирование”, читаемого для специальности ГФ.

Выполнение работ и изучение алгоритмов предусмотренных в рамках данного курса позволит более свободно ориентироваться в материале спецкурсов “Цифровая обработка и интерпретация данных сейсморазведки” и “Системы и алгоритмы обработки данных сейсморазведки”.

Лабораторная работа № 1.

Решение прямой кинематической задачи для горизонтально-слоистой модели среды.

Решение двумерной кинематической задачи для произвольной горизонтально-слоистой модели среды, т. е. уравнение годографа, в явном виде получить не удастся [1,3], поэтому, обычно, для расчетов используется параметрическая форма уравнения годографа. Для n -ой границы оно имеет вид

$$t_n = 2 \sum_{i=0}^n \delta t_i = 2 \sum_{i=0}^n \frac{h_i}{V_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

$$x_n = 2 \sum_{i=0}^n \delta x_i = 2 \sum_{i=0}^n h_i \operatorname{tg} \alpha_i,$$

где $\delta t_i = h_i / V_i \cos \alpha_i$ - время пробега волны в i -ом слое по лучу с углом падения α_i ,

а $\delta x_i = h_i \operatorname{tg} \alpha_i$ - горизонтальное смещение по лучу в i -ом слое.

В соответствии с законом Снеллиуса для заданного луча с углом входа α_0 в первом слое

$$\frac{\sin \alpha_0}{V_0} = \frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \dots = \frac{\sin \alpha_n}{V_n} = p, \quad (2)$$

где p называется параметром луча.

Для заданной модели среды (известны мощности слоев h_i и пластовые скорости V_i в них) параметрические уравнения (1) с учетом (2) приобретают вид

$$t_n(p) = 2 \sum_{i=0}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - p^2 V_i^2}} \quad (3)$$

$$x_n(p) = 2 \sum_{i=0}^n \frac{h_i}{\sqrt{1 - p^2 V_i^2}}$$

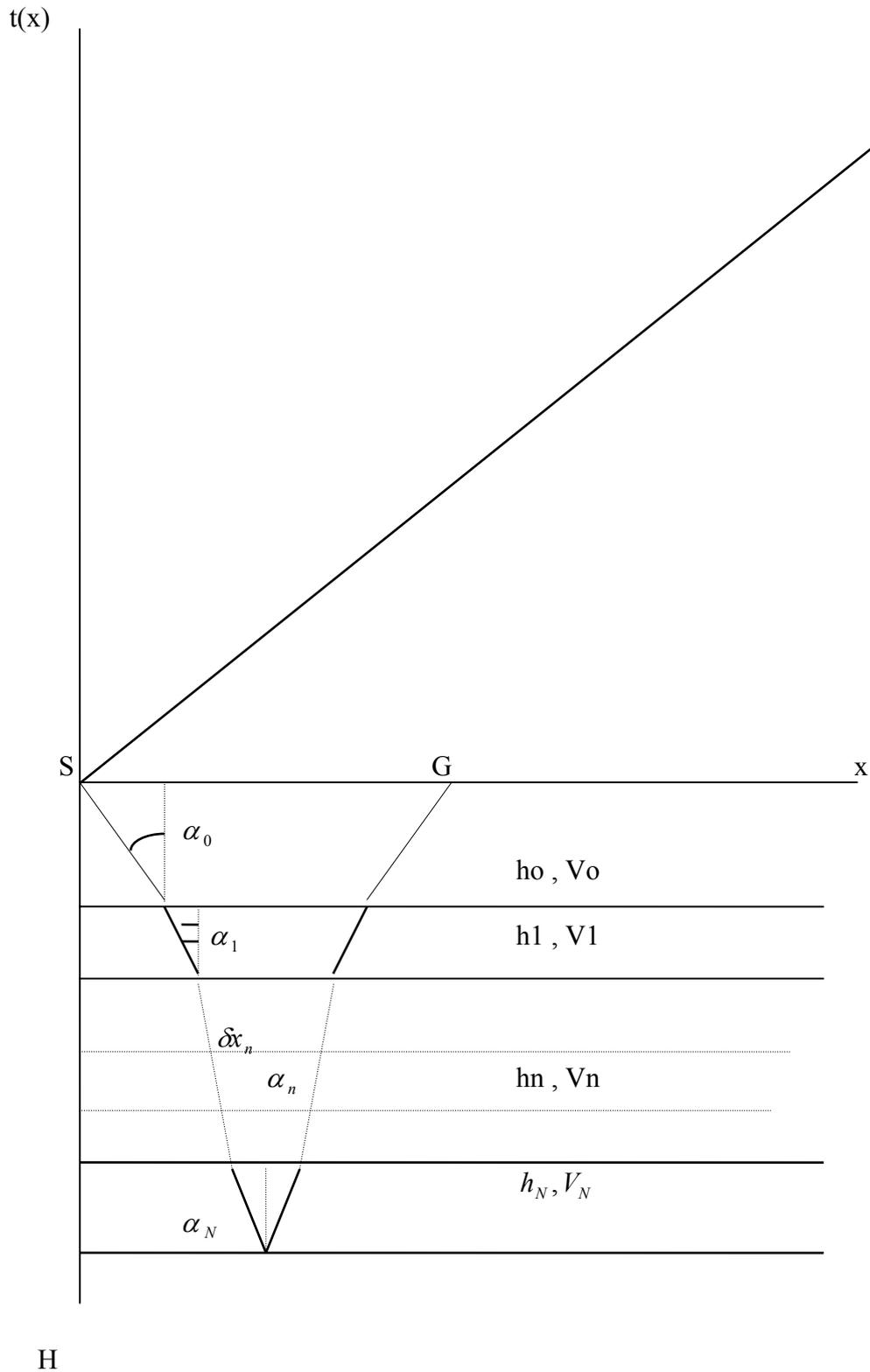


Рис. 1 Схема расчета лучей и годографы для горизонтально-слоистой модели среды
 $S(0,0)$ - пункт взрыва
 $G(X_m,0)$ - пункт приема
 Годографы 1- прямой, 2 - отраженной от 1-ой границы, 3 - преломленной от 1-ой границы, 4 - отраженной от второй границы волн и т.д.

где использованы соотношения $\sin \alpha_i = p V_i$ и $\cos \alpha_i = \sqrt{1 - p^2 V_i^2}$.

Анализ уравнения годографа показывает, что производные по параметру p равны

$$\frac{dt_n(p)}{dp} = t'_p = 2 \sum_{i=0}^N \frac{h_i p V_i}{(1 - p^2 V_i^2)^{3/2}} \quad (4)$$

$$\frac{dx(p)}{dp} = x'_p = 2 \sum_{i=0}^N \frac{h_i V_i}{(1 - p^2 V_i^2)^{3/2}}$$

при $p=0$ (вертикальный луч), годограф имеет минимум t_n

$$t_n = 2 \sum_{i=0}^N \frac{h_i}{V_i} \quad \text{и} \quad x_n = 0, \quad (5)$$

$$\text{при } p \rightarrow \frac{1}{V_n} \quad \lim_{p \rightarrow \frac{1}{V_n}} \frac{t'_p}{x'_p} = \frac{1}{V_n},$$

что характеризует то обстоятельство, что годограф преломленной волны от $(n - 1)$ - ой границы является асимптотой для годографа отраженной волны от n - ой границы (рис 1.).

Исходными данными являются параметры пластовой модели (табл. 1): количество слоев N , мощности h_i и пластовые скорости V_i , а также параметры расстановки X_0 , расстояние между каналами dx и число каналов M .

Расчет годографов проводится в следующей последовательности:

- для первой границы рассчитывается начальный луч с $p=0$, который имеет точку выхода на поверхность $x=0$,
- поскольку параметр луча для заданной точки выхода определить аналитически не представляется возможным [1], с заданным шагом по α_0 $\delta\alpha_0$, которому соответствует параметр $p = \sin \alpha_0 / V_0$ вычисляется такой, чтобы точка выхода была бы правее координаты расположения текущего сейсмоприемника.
- далее по лучу определенному для предыдущего сейсмоприемника (или с $p=0$) и вновь вычисленному лучу производится уточнение решения (параметра p) методом половинного деления до достижения с заданной точностью ε точки расположения текущего сейсмоприемника x_m .
- для луча с таким параметром p рассчитывается $t_{nm}(x_m)$, которое заносится в двумерную таблицу.

- Такая процедура выполняется для каждого сейсмоприемника m в расстановке и каждой отражающей границы n . В процессе вычислений необходимо постоянно контролировать величину p , которая не должна превышать $1/V_{max}$ для всех покрывающих пластов (случай полного внутреннего отражения). В этом случае расчет текущего годографа прекращается, т.к. отсутствует проходящая вниз волна.

Для дополнительных оценок для каждой границы вычисляются величины средних и среднеквадратических скоростей

$$V_{cpn} = \sum_{i=0}^n h_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i \quad (6)$$

$$V_{rmsn} = \sqrt{\sum_{i=0}^n V_i h_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i} = \sqrt{\sum_{i=0}^n V_i^2 \delta t_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i} .$$

Результаты расчетов представляются двумерной таблицей (массивом), в которой каждая строка содержит времена прихода $t_{nm}(x_m)$ отраженной от n -ой границы волны в точках расположения сейсмоприемников x_m . Данная таблица будет использована в качестве исходных данных в работе 2.

Примечания:

- а) Параметры расстановки принимаются следующими

$$X_0=0, \quad \delta x = 25\text{м}, \quad M=48.$$

- б) Скорость в нижнем полупространстве $V_6=3200$ м/сек.

Контрольные вопросы.

1. Возможно ли при расчете годографов выбрать постоянным шаг по параметру p , а не по углу падения луча α_0 ?

2. Какие значения скорости V_{cp} или V_{rms} выше для заданной модели среды и почему?

Таблица 1.

Пластовые модели.

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
h_n	V_n								
100	1500	50	900	70	850	60	1100	120	1700
200	1800	120	1400	140	1300	210	1700	120	2000
150	2100	100	1800	90	2000	150	2000	150	2400
200	2400	70	2100	200	2200	70	1900	60	2100
50	2700	150	2500	200	2700	110	2500	200	2900
Вариант 6		Вариант 7		Вариант 8		Вариант 9		Вариант 10	
100	1600	140	1600	140	1500	80	1000	90	1300
150	1900	100	1900	100	1800	160	1400	150	1600
200	2300	120	2300	120	2100	100	1900	140	2000
100	2000	40	2000	40	2300	170	2300	100	2400
140	2700	150	2700	150	2500	170	2700	200	2800
Вариант 11		Вариант 12		Вариант 13		Вариант 14		Вариант 15	
100	1300	50	1000	70	1500	60	1600	120	1600
200	1600	120	1400	140	1800	210	1900	120	1900
150	2000	100	1900	90	2100	150	2300	150	2300
200	2400	70	2300	200	2300	70	2000	60	2000
50	2800	150	2700	200	2500	110	2700	200	2700
Вариант 16		Вариант 17		Вариант 18		Вариант 19		Вариант 20	
100	1700	50	1100	70	900	60	850	120	1500
200	2000	120	1700	140	1400	210	1300	120	1800
150	2400	100	2000	90	1800	150	2000	150	2100
200	2100	70	1900	200	2100	70	2200	60	2400
50	2900	150	2500	200	2500	110	2700	200	2700

Лабораторная работа № 2.

Решение обратной кинематической задачи для горизонтально-слоистой модели среды

Из выражений (1) и (2) видно, что уравнение годографа для заданной границы дает тождественный результат для любой последовательности перекрывающихся пластов, т. е. не зависит от порядка их следования. Это означает эквивалентность годографов для различных моделей, представляющих произвольные комбинации одних и тех же слоев, что позволяет сделать вывод об однозначности решения прямой задачи и неоднозначности решения обратной (без привлечения дополнительной информации).

Решение обратной задачи, как правило, осуществляется в рамках традиционной модели средних скоростей [3], т. е. реальная слоистая модель заменяется однородной средой с эффективными параметрами h_{eff} и V_{eff} для каждой границы раздела. Уравнение годографа в этом случае имеет вид

$$t^2(x) = \frac{1}{V_{eff}^2} x^2 + \frac{4h_{eff}^2}{V_{eff}^2} \quad (7)$$

$$\text{или} \quad t^2(x) = ax^2 + c.$$

Здесь следует учесть то обстоятельство, что годографы для случая горизонтально-слоистой среды не являются гиперболическими, а имеют сложную форму, которая в диапазоне удалений до 2 км может быть с успехом аппроксимирована кривой второго порядка (в действительности она описывается полиномом более высокого порядка).

Такая (в данном случае гиперболическая) аппроксимация может быть осуществлена по методу наименьших квадратов

$$\sum_{m=0}^M (t_{nm}^2(x_m) - ax_m^2 - c)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где m - номер сейсмоприемника,

$t_{nm}(x_m)$ - время прихода волны от n -ой границы m -ому сейсмоприемнику, имеющему горизонтальную координату X_m .

Неизвестными являются коэффициенты a и c . При дифференцировании получаем

$$\frac{d}{da} \rightarrow 2 \sum_{m=0}^M (t_{nm}^2(x_m) - ax_m^2 - c)x_m^2 = 0 \quad (9)$$

$$\frac{d}{dc} \rightarrow 2 \sum_{m=0}^M (t_{nm}^2(x_m) - ax_m^2 - c) = 0 \quad .$$

Окончательно имеем

$$\begin{vmatrix} \sum_{m=0}^M x_m^4 & \sum_{m=0}^M x_m^2 \\ \sum_{m=0}^M x_m^2 & N \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a \\ c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{m=0}^M t_{nm}^2 x_m^2 \\ \sum_{m=0}^M t_{nm}^2 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Решение системы (10) позволяет определить коэффициенты a и c , что с учетом (7) дает

$$\begin{aligned} V_{eff} &= \frac{1}{\sqrt{a}} \\ h_{eff} &= \sqrt{\frac{c}{4a}} \end{aligned} \quad (11)$$

Такая операция проводится последовательно для каждого из рассчитанных годографов, т.е. n изменяется от 0 до N .

Практика показывает, что эффективные параметры $V_{эфф}$ и $h_{эфф}$ не равны $V_{ср}$ и H соответствующим данной отражающей границ, однако могут служить хорошим приближением.

Параметры модели определяются путем последовательного пересчета

$$\tilde{h}_i = h_{eff} - \sum_{k=0}^{i-1} \tilde{h}_k \quad (12)$$

$$\tilde{t}_{effi} = h_{eff} / V_{eff}$$

$$\tilde{V}_i = \tilde{h}_i (\tilde{t}_{effi} - \tilde{t}_{effi-1})$$

для каждой границы n с учетом уже вычисленных значений для перекрывающихся пластов. Для первого пласта $V_{эфф}=V_0$ и $H_{эфф}=h_0$. Для последующих пластов вычисленные значения отличаются от теоретических. Различия тем выше, чем больше скоростная дифференциация разреза. Сравнительный анализ вычисленных и исходных значений позволяет сделать заключение о точности решения обратной задачи для данной модели.

Контрольные вопросы

1. Какие пласты Вашей модели наиболее сильно влияют на точность определения эффективных параметров? Почему?
2. Какой модели среды соответствует гиперболическая аппроксимация годографов отраженных волн?

Лабораторная работа № 3.

Решение прямой кинематической задачи для наклонно-слоистой модели среды.

Расчет годографов отраженных волн от плоско параллельных наклонных границ можно провести, используя алгоритм примененный в работе 1. Рассмотрим рис. 2 , из которого видно, что расстояние SG , представляющее удаление x приемника от источника S для горизонтально-слоистой модели можно пересчитать в SG - вынос для наклонно-слоистой модели ($\tilde{x}(p)$). Для этого находим

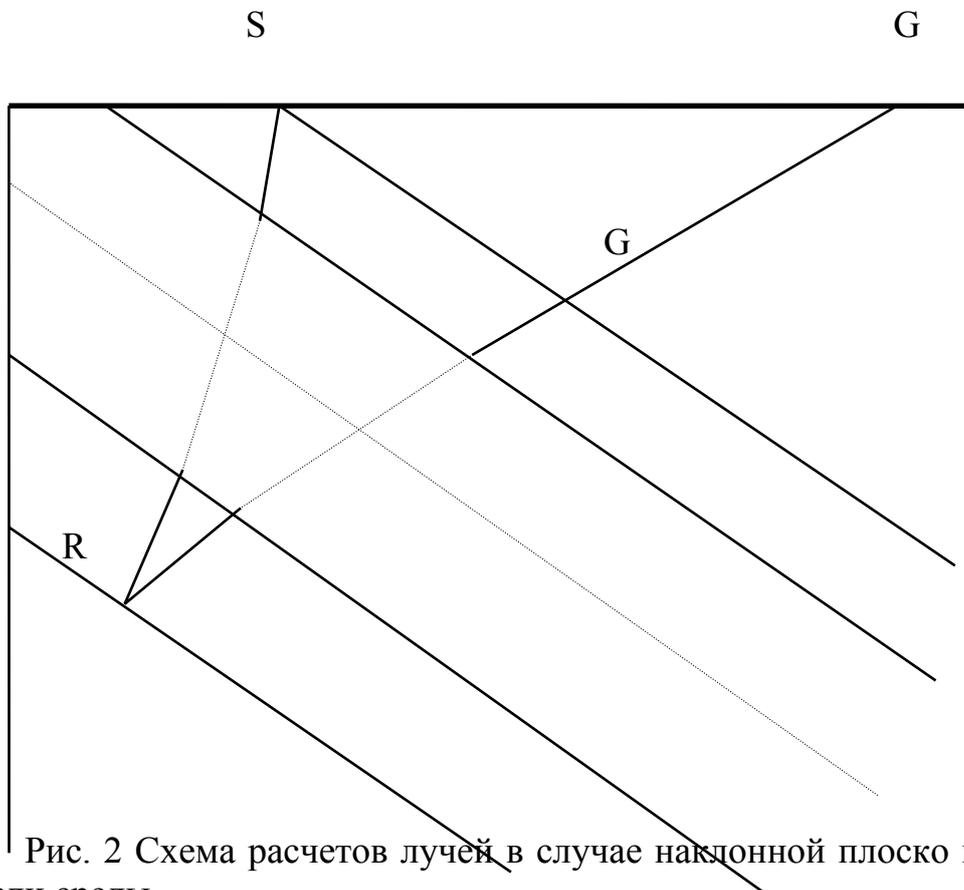


Рис. 2 Схема расчетов лучей в случае наклонной плоско параллельной модели среды.

$S(0,0)$ - пункт взрыва

$G(,)$ - точка выхода луча для горизонтально-слоистой модели

$G'(x,0)$ - точка выхода луча для наклонно-слоистой модели

φ - угол наклона границ модели

α_0 - угол входа луча для горизонтально-слоистой модели

$$\tilde{x}(p) = SG' = x \frac{\cos(\varphi + \alpha_0) \cos \varphi + \sin(\varphi + \alpha_0) \sin \varphi}{\cos(\varphi + \alpha_0)} = x \frac{\cos \alpha_0}{\cos(\varphi + \alpha_0)} \quad (13)$$

Поскольку длина луча до точки выхода на дневную поверхность увеличивается на SG'

$$SG' = x \sin \varphi / \cos(\varphi + \alpha_0), \quad (14)$$

а время пробега волны вдоль луча $\tilde{t}(p)$ определяется путем коррекции времени пробега для горизонтально-слоистой модели $t(p)$

$$\tilde{t}(p) = t(p) + \frac{x \sin \varphi}{V_0 \cos(\varphi + \alpha_0)}. \quad (15)$$

Такой способ позволяет получить параметры, описывающие уравнение годографа для n -ой границы при заданном значении параметра $p = \frac{\sin \alpha_0}{V_0}$.

Теоретические значения V_{cp} и V_{rms} при неизменных параметрах исходной модели (V_i и h_i) не зависят от угла наклона φ

$$V_{cpn} = \sum_{i=0}^n h_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i \quad (16)$$

$$V_{rmsn} = \sqrt{\sum_{i=0}^n V_i h_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i} = \sqrt{\sum_{i=0}^n V_i^2 \delta t_i / \sum_{i=0}^n \delta t_i}.$$

Расчеты проводятся по следующей схеме:

- Вначале рассчитываются параметры луча, выходящего на дневную поверхность, для горизонтально-слоистой модели.
- Затем производится расчет точки выхода для наклонно-слоистой модели, так чтобы его координата была бы больше координаты расположения сейсмоприемника.
- Уточнение параметра p и, как следствие, времени пробега вдоль луча производится методом половинного деления (каждый раз луч рассчитывается с учетом коррекции для наклонно-слоистой модели). Значения углов наклона модели берутся из табл. 2.

Результаты расчетов сводятся в аналогичную работе 1 таблицу, в которой строки соответствуют временам по годографам $t_{nm}(x_m)$ для заданных удалений сейсмоприемников x_m . Расчитанная таблица будет в дальнейшем использована в качестве исходных данных к работе 4.

Таблица 2.

Углы наклона модели среды.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ град.	5	12	8	15	9	7	10	16	11	4
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
φ град.	6	7	10	9	11	4	16	6	8	15

Контрольные вопросы

1. Как пересчитать параметр луча p для в реальный параметр для наклонной модели?
2. Какая величина ε обеспечивает точность расчета времени пробега волны вдоль луча в 1 мсек?

Лабораторная работа № 4.

Решение обратной задачи для наклонно-слоистой модели среды.

В случае наклонной слоистой модели среды при решении обратной задачи необходимо определить три эффективных параметра для каждой из границ: $H_{эфф}$, $V_{эфф}$ и $\varphi_{эфф}$.

Решение можно проводить различными способами, однако поскольку в нашем случае исходными данными являются параметрические уравнения годографов, рассчитанные в предыдущей работе (т.е. как бы проведена корреляция осей синфазности на сейсмограммах), то решение будем проводить путем гиперболической аппроксимации годографов методом наименьших квадратов.

Уравнение годографа для наклонной границы имеет вид

$$t^2(x) = \frac{1}{V_{eff}^2} x^2 - \left(\frac{4h_{eff}}{V_{eff}^2} \sin \varphi \right) x + \frac{4h_{eff}^2}{V_{eff}^2} \quad (17)$$

или

$$t^2(x) = ax^2 + bx + c.$$

Применение метода наименьших квадратов дает выражение

$$\sum_{m=0}^M (t_m^2(x_m) - ax_m^2 - bx_m - c)^2 \rightarrow \min,$$

которое минимизируется для переменных a , b и c .

$$\frac{d}{da} \rightarrow 2 \sum_{m=0}^M (t_m^2(x_m) - ax_m^2 - bx_m - c)x_m^2 = 0$$

$$\frac{d}{db} \rightarrow 2 \sum_{m=0}^M (t_m^2(x_m) - ax_m^2 - bx_m - c)x_m = 0$$

$$\frac{d}{dc} \rightarrow 2 \sum_{m=0}^M (t_m^2(x_m) - ax_m^2 - bx_m - c) = 0.$$

Получаем систему линейных уравнений

$$\begin{pmatrix} \sum x_m^4 & \sum x_m^3 & \sum x_m^2 \\ \sum x_m^3 & \sum x_m^2 & \sum x_m^1 \\ \sum x_m^2 & \sum x_m^1 & N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum t_m^2 x_m^4 \\ \sum t_m^2 x_m^2 \\ \sum t_m^2 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

решение которой позволяет определить эффективные параметры модели

$$\begin{aligned} V_{eff} &= \frac{1}{\sqrt{a}} \\ h_{eff} &= \sqrt{\frac{c}{4a}} \\ \varphi_{eff} &= \arcsin\left(\frac{bV_{eff}^2}{4h_{eff}}\right) = \arcsin\left(\frac{b}{4ah_{eff}}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

последовательно для каждого пласта, начиная с верхнего, и осуществить пересчет эффективных параметров в пластовые.

Сравнение полученных и исходных данных является заключительным этапом работы, позволяя оценить точность решения обратной задачи и факторы вызывающие искажения.

Контрольные вопросы

1. Почему параметры определенные в рамках модели средних скоростей называются эффективными?
2. Как влияет длина расстановки на точность определения эффективных параметров?

Список литературы.

1. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных методом отраженных волн. М., Гостоптехиздат, 1959 г., 451 стр. с илл.
2. Ризниченко Ю.В. Сейсморазведка слоистых сред, М., Недра, 1985 г., 183 стр. с илл.
3. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн., М., Недра, 1985 г., 268 стр. с илл.

Оглавление.

Введение	3
1. Лабораторная работа N° 1. Решение прямой кинематической задачи для горизонтально-слоистой модели среды	4
2. Лабораторная работа N° 2. Решение обратной кинематической задачи для горизонтально-слоистой модели среды	9
3. Лабораторная работа N° 3. Решение прямой кинематической задачи для наклонно-слоистой модели среды	11
4. Лабораторная работа N° 4. Решение обратной задачи для наклонно-слоистой модели среды	14
Список литературы	17

Карпетов Григорий Артавазович

Лабораторные работы по курсу “Прямые и обратные задачи в сейсмо-разведке” для студентов специальности 080400 “Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых”

Св. тематический план 1997 г.

Подписано в печать
Объем 1.0 уч.-изд. л.
Заказ

Тираж 50 экз.
Формат 60 x 90 / 16

117917, Ленинский просп., 65, ГАНГ
Отдел оперативной полиграфии