

В.И.Бондарев, Н.А.Крылаткова, Р.В.Кузнецов, С.М.Крылатков

ИЗУЧЕНИЕ ДВУМЕРНОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕД ПО ГОДОГРАФАМ ПЕРВЫХ ВОЛН

Задача построения двумерного скоростного разреза по наблюдаемым годографам первых волн весьма актуальна как в инженерной сейсморазведке, так и при исследованиях строения верхней коры методом глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ).

Проблема вовлечения в арсенал сейсморазведчиков методов построения по сейсмическим данным двумерных скоростных разрезов состоит из умения и возможности эффективно решать прямые и обратные задачи сейсморазведки в двумернонеоднородных средах.

Сторона проблемы, касающаяся прямых задач, в принципиальном отношении разработана достаточно подробно. В настоящее время существует несколько различных подходов к решению двумерных прямых задач [1,2]. Главные трудности при этом связаны с технологическими проблемами решения: методами задания скоростного разреза, способами интерполяции свойств, времен и координат, требуемыми объемами вычислений, точностью и устойчивостью решения и т.д. С нашей точки зрения наиболее эффективной является методика решения двумерных прямых задач, предложенная Т.И. Облогиной [2].

Вторая сторона данной проблемы гораздо сложнее первой и, в принципе, не имеет однозначного решения. Поэтому решение обратной задачи сейсморазведки на первых волнах всегда осуществляется в рамках какой-либо модели среды конкретного вида. В процессе решения подлежат определению лишь численные параметры этой модели. В настоящее время существуют способы решения обратной двумерной задачи, предполагающие в своей основе либо постоянство угла наклона изолиний скорости в модели среды [3,4], либо то, что двумерная скоростная функция, описывающая модель среды, удовлетворяет определенным требованиям (например, обладает свойствами гармоничности или однородности и т.п.) [6]. К сожалению, следует отметить, что существующие способы недостаточно точны и эффективны даже в условиях тех конкретных моделей, для которых они построены. Средняя погрешность определения глубины отнесения скорости в разрезе, как правило, не менее 5% даже для точных теоретических годографов. Это практически привело к тому, что двумернонеоднородные модели сред в процессе интерпретации используются сравнительно редко. А изменчивость среды по горизонтали выявляют лишь на основе сопоставления данных на ряде соседних баз наблюдений, в пределах каждой из которых годографы анализируются и интерпретируются с учетом лишь вертикального градиента скорости. Для того, чтобы в процессе интерпретации наблюдаемых годографов первых волн стало возможным широкое использование моделей двумернонеоднородных сред, необходимо создать достаточно эффективный аппарат, соединяющий в себе методики решения прямых и обратных задач для таких моделей. Предлагаемый ниже подход, на наш взгляд, отвечает этим условиям.

Основу разработанного нами подхода составляют два главных допущения. Первое допущение заключается в том, что мы признаем невозможность определения произвольно большого числа параметров скоростной модели среды по совокупности наблюдаемых годографов, содержащих ограниченное число точек наблюдений N на заданной базе исследований. Эмпирически установлено, что число определяемых параметров разреза не может превосходить величину $(1/5-1/3)N$. Второе допущение заключается в том, что изучаемое двумернонеоднородное полупространство должно представлять собой композицию небольшого числа элементарных компонент (блоков), форма и распределение скорости распространения упругих волн в которых подчиняются следующим двум условиям:

- траектории лучей и времена пробега волн в каждом из блоков описываются несложными формулами;
- в разрезе отсутствуют локальные зоны аномально высоких (или низких) скоростей, что должно гарантировать непрерывность теоретических годографов на изучаемом профиле.

Сформулированные условия легко удовлетворить, если в качестве элементарных компонент

использовать блоки с вертикальными границами, скорость распространения упругих волн в которых может меняться по линейному закону с вертикальной или произвольной ориентировкой вектора градиента скорости. Представление о возможной структуре изучаемого разреза на основе таких элементарных блоков можно получить из данных, приводимых на рис. 1.

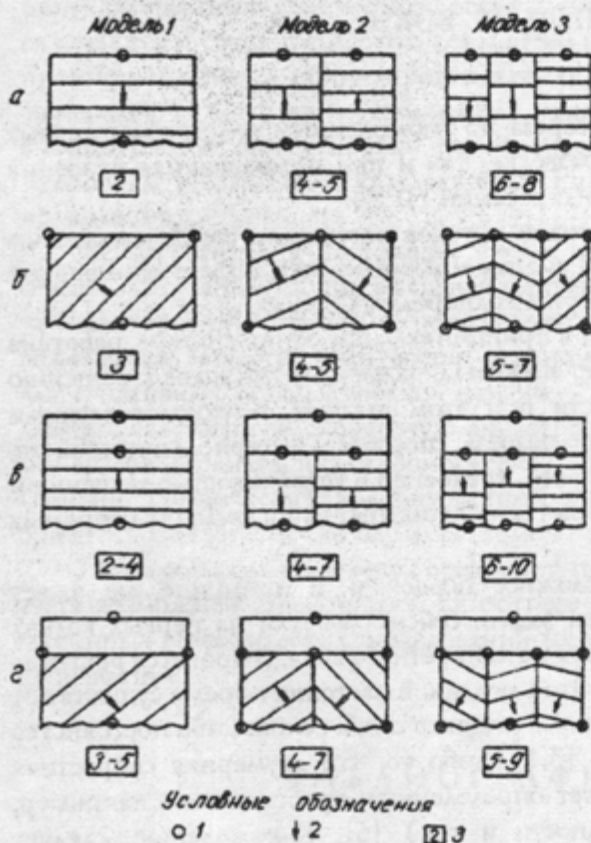


Рис. 1. Принципиальная схема возможных скоростных моделей среды в пределах фиксированной базы наблюдений: а) на основе блоков с двухпараметрическим законом распределения скорости; б) на основе блоков с трехпараметрическим законом распределения скорости; в) на основе комбинации однородного слоя и блоков с двухпараметрическим законом распределения скорости; г) на основе комбинации однородного слоя и блоков с трехпараметрическим законом распределения скорости; 1 - положение точек задания скорости; 2 - направление градиента скорости; 3 - число возможных параметров модели среды в комбинации блоков

Если для заданной системы наблюдаемых годографов мы выбрали наиболее подходящую, с точки зрения интерпретатора, комбинацию элементарных блоков, сейсмические свойства которых описываются заданным числом неизвестных параметров, то процесс решения обратной задачи - процесс поиска наиболее оптимальных численных значений этих параметров - можно представить себе состоящим из нескольких этапов. На первом этапе решения строим так называемую функцию цели - функцию, представляющую собой сумму квадратов невязок между наблюдаемыми и рассчитанными для выбранной модели среды теоретическими годографами. Эту функцию можно представить в следующем виде:

$$S = \sum_{k=1}^m \left(\sum_x (t_k^{\text{набл}}(x) - t_k^{\text{теор}}(x, p_1, p_2, \dots, p_n)) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где k - номер наблюдаемого годографа на заданной базе наблюдений; m - общее количество годографов на профиле; p_1, p_2, \dots, p_n - параметры, описывающие распределение скоростей в разрезе для данной базы наблюдений.

Если принять, что начальные значения всех параметров p_i^0 известны, то расчет теоретических годографов для принятой модели среды становится вполне возможным. При этих предположениях функцию цели (1) можно записать в линеаризированном виде в следующей форме:

$$S = \sum_{k=1}^m \left(\sum_x (\Delta t_k(x) - \sum_{i=1}^n (\partial t_k^{\text{теор}} / \partial p_i)_0 \Delta p_i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $\Delta t_k(x) = t_k^{\text{набл}}(x) - t_k^{\text{теор}}(x, p_1, p_2, \dots, p_n)$; Δp_i - малые приращения искомых параметров.

При такой форме записи функции цели из условия ее минимизации можно легко получить линейную систему уравнений относительно малых приращений параметров:

$$a_{11}\Delta p_1 + a_{12}\Delta p_2 + \dots + a_{1n}\Delta p_n = \sum_{k=1}^m (\sum \Delta t_k(x) (\partial t_k / \partial p_1)_o), \quad (3)$$

$$a_{21}\Delta p_1 + a_{22}\Delta p_2 + \dots + a_{2n}\Delta p_n = \sum_{k=1}^m (\sum \Delta t_k(x) (\partial t_k / \partial p_2)_o),$$

$$a_{n1}\Delta p_1 + a_{n2}\Delta p_2 + \dots + a_{nn}\Delta p_n = \sum_{k=1}^m (\sum \Delta t_k(x) (\partial t_k / \partial p_n)_o),$$

где

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^m (\sum (\partial t_k / \partial p_i)_o (\partial t_k / \partial p_j)_o).$$

Решив эту систему и найдя искомые поправки, можно уточнить начальные значения параметров исходной модели по рекуррентной формуле $p_i = p_i^o + \Delta p_i$. Продолжая таким образом итерационный процесс, на некотором шаге можно получить значения параметров принятой модели среды, которые дадут минимальные расхождения между наблюдаемыми и рассчитанными теоретическими годографами. Такое решение в выбранном классе моделей будет наилучшим. Из этого факта, однако, не следует, что наш результат - действительно самая лучшая модель среды. Конечная цель интерпретации - получение истинного скоростного разреза среды - достигнута лишь условно: найденный скоростной разрез лучше всех соответствует наблюдаемым годографам в выбранном классе использованных моделей. Возможно, что в другом классе моделей может быть получен еще лучший результат, с точки зрения близости теоретического и наблюдаемого годографов. И хотя этот факт формально огорчителен, тем не менее описанный подход в большинстве случаев, как показывает практика, позволяет получить приемлемое с инженерной точки зрения решение.

Для того, чтобы продемонстрировать правомерность и эффективность предлагаемого подхода, рассмотрим несколько простейших случаев.

В качестве первого примера рассмотрим ситуацию, когда скоростной разрез на базе наблюдений можно представить одним блоком, скорость распространения упругих волн в котором описывается трехпараметрической функцией линейного вида [5]:

$$V(x,z) = V_o + k(x \sin \varphi + z \cos \varphi), \quad (4)$$

где φ - угол наклона изолиний скорости, k - градиент скорости.

Для выбранной модели среды расчет теоретических годографов (прямых, встречных, нагоняющих и т.п.), а также производных от годографов по параметрам среды (их всего три) не представляет особого труда. Именно поэтому данная модель может служить эталоном для проверки правильности и эффективности предлагаемой методики.

Для иллюстрации способа предположим, что на базе наблюдений $L=230$ м был задан скоростной разрез (4) с параметрами $V_o=300$ м/с, $k=2,6(1/с)$, $\varphi = 1,1$ рад. На этой базе рассчитаны два встречных годографа. Эти годографы приняты за наблюдаемые, по которым следует найти параметры скоростного разреза по предложенной методике. В качестве начального приближения для скоростей упругих волн в трех точках искомого разреза V_1, V_2, V_3 (рис.1,б, модель 1) нами были произвольно заданы значения скоростей распространения упругих волн, весьма заметно отличающиеся от истинных.

Производные от годографов по каждому из параметров находились численно. Ход процесса итерационного определения параметров хорошо прослеживается по данным, приводимым в табл. 1.

Как видно из представленных расчетов, уже четвертая итерация позволяет получить практически точные значения параметров разреза. Многочисленные расчеты подтверждают, что конечные результаты фактически не зависят от того, какие значения определяемых параметров приняты в качестве начального приближения, лишь бы эти значения лежали в разумных пределах.

В качестве второго примера рассмотрим случай, когда с точки зрения интерпретатора изучаемую среду на базе наблюдений целесообразно представить в виде комбинации двух блоков, в каждом из которых скорость распространения упругих волн увеличивается с глубиной по линейному закону. Свойства траекторий сейсмических лучей в изолированном блоке с линейным

Таблица 1

Результаты последовательного нахождения параметров модели среды 1, показанной на рис.1,б

Номер итерации	V_{1z} м/с	V_{2z} м/с	V_y м/с	V_σ м/с	k 1/с	ϕ радиан
1	527,1	527,1	1054,2	527,1	4,584	0,000
2	211,2	824,1	789,7	211,2	3,564	0,845
3	282,4	838,6	759,9	282,4	2,976	0,949
4	300,1	832,7	715,9	300,1	2,656	1,059
5	300,0	832,9	703,86	300,0	2,607	1,095
6	300,0	832,9	702,3	300,0	2,601	1,099
Истинные значения	300,0	832,9	702,0	300,0	2,600	1,100

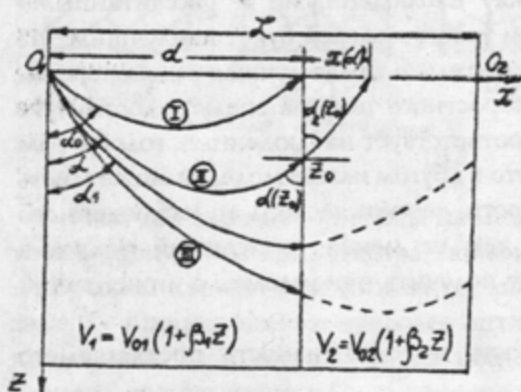


Рис.2. Схема сейсмических лучей для модели среды N2, изображенной на рис.1,а:

I - лучи, выходящие на линию наблюдений до границы блоков; II - лучи, начинающие возврат в первом блоке, но выходящие на линию наблюдений во втором блоке; III - лучи, начинающие возврат во втором блоке

увеличением скорости с глубиной общеизвестны. Поэтому мы рассмотрим более подробно особенности траектории сейсмических лучей в среде, состоящей из двух таких блоков (рис.2). Очевидно, что при возбуждении упругих колебаний в пункте O_1 все возможные траектории сейсмических лучей можно разделить на три группы. В первую группу войдут все лучи, которые будут выходить на профиль наблюдений до границы блоков. Во вторую группу попадут все лучи, которые начинают возврат к поверхности земли в первом блоке. Третью группу составляют лучи, которые в первом блоке являются только нисходящими.

Рассмотрим более подробно траекторию лучей второй группы. Луч этой группы, вышедший из источника под углом α , встретит границу блоков на глубине:

$$z_0 = (1/\beta_1) (\sqrt{1 - \beta_1^2 d^2 + 2\beta_1 d c t g \alpha} - 1) \quad (5)$$

Угол подхода сейсмического луча к границе блоков будет определяться из закона Снеллиуса по формуле

$$\sin \alpha(z_0) = (1 + \beta_1 z_0) \sin \alpha \quad (6)$$

На границе блоков этот луч испытает преломление, в результате чего угол наклона его во второй среде:

$$\alpha_2(z_0) = \arcsin \sqrt{1 - ((V_2(z_0)/V_1(z_0)) \cos \alpha(z_0))^2} \quad (7)$$

Зная координату начала прослеживаемого луча во втором блоке и угол его выхода, через цепочку очевидных формул можно определить координату точки выхода этого луча на профиль наблюдений:

$$x(\alpha) = (1/\beta_2) \operatorname{ctg} \alpha_2(0) - \sqrt{1/\beta_2^2 \sin^2 \alpha_2(0) - ((z_0 + 1/\beta_2))^2}, \quad (8)$$

$$\sin \alpha_2(0) = ((1 + \beta_1 z_0)/(1 + \beta_2 z_0)) \sin \alpha_0. \quad (9)$$

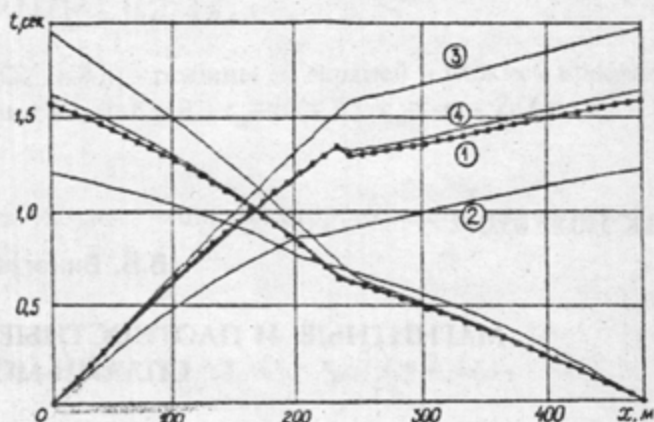
Приведенные формулы позволяют выполнить трассирование каждого луча второй группы до точки его выхода на профиль наблюдений. Эти же формулы принципиально применимы и для лучей третьей группы. Зная траектории сейсмических лучей, легко можно записать формулы для расчета времени пробега волны по соответствующей траектории.

Изложенная методика расчета траекторий и времен пробега сейсмических волн в такого рода средах может быть легко распространена на произвольное число вертикальных неоднородных блоков.

В качестве иллюстрации к сказанному рассмотрим второй пример. На базе наблюдений $L=470$ м граница двух блоков была задана на ПК 230. Скорости в каждом из блоков менялись по линейным законам, существенно отличающимся друг от друга. Рассчитанные по предложенной выше схеме два встречных годографа были взяты в качестве исходных (наблюденных) для задачи восстановления скоростного разреза. При этом в качестве пятого искомого параметра разреза

Рис. 3. Исходные годографы первых волн и теоретические годографы, соответствующие последовательным шагам итерационного процесса для модели среды 2 (см. рис. 1,а):

1 - исходные годографы; 2 - годографы, соответствующие начальному приближению искомым параметрам; 3 - годографы для модели с параметрами, определенными после первой итерации; 4 - годографы для модели с параметрами, определенными после второй итерации



была выбрана координата выхода на профиль контакта блоков (рис. 1,а, модель 2). Представление о виде годографов для модели среды, соответствующей начальным значениям этих пяти параметров, можно получить из рис. 3.

Более подробное представление о характере сходимости определяемых итерационно параметров разреза к истинным значениям можно получить из табл. 2.

Таблица 2

Результаты последовательного нахождения параметров модели среды 2, показанной на рис. 1,а

Номер итерации	V_1 , м/с	β_1 , 1/м	d	V_2 , м/с	β_2 , 1/м
1	250.0	0.0150	200.0	350.0	0.0150
2	196.6	0.0050	244.4	426.0	0.0085
3	207.4	0.0084	231.8	434.7	0.0090
4	199.8	0.0099	229.9	430.1	0.0099
5	200.1	0.0100	231.1	428.7	0.0102
Истинные значения	200.0	0.0100	230.0	430.0	0.0100

Как видно из представленных данных, поиск пяти искомым параметров по годографам наблюдаемых волн осуществляется быстро. Это позволяет утверждать, что методика изучения двумерно-неоднородных сред по предложенной технологии может быть положена в основу создания эффективного пакета программ для интерпретации годографов первых волн для нужд инженерной сейсморазведки.

Изложенный подход к использованию предложенных интерпретационных моделей сразу открывает широкие возможности более объективного изучения достаточно сложных геологических разрезов сейсмической разведкой с использованием первых волн.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоносова А.В., Таджимухамедова С.С., Алексеев А.С. К расчету годографов и геометрического расхождения лучей в неоднородных средах // Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. - М.: Наука, 1967. - С.124-136.
2. Бурмаков Ю.Ф., Облогина Т.И. Определение лучей и годографов дифрагированных волн численными методами // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. - 1968. - N12. - С.81-88.
3. Вавилова Т.И. Решение обратной кинематической задачи для случая наклонного градиента скорости распространения упругих волн // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, сб.4. - Л.: Наука, 1962. - С.110-120.
4. Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф. Детальное изучение земной коры в Байкальской рифтовой зоне по данным рефрагированных волн // Геология и геофизика. - Новосибирск: Наука, - 1983. - N12. - С.82-91.
5. Мишенькина З.Р. Интерпретация годографов рефрагированных волн при наличии вертикального и горизонтального градиентов скорости // Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1967. - N4.
6. Пийп В.Б., Облогина Т.И. Восстановление двумерной скоростной функции методом подбора // Прикладная геофизика, N34. - М.: Гостоптехиздат, 1962. - С.87-117.

УДК 550.83.05.012

В.Б. Виноградов

МАГНИТНЫЕ И ПЛОТНОСТНЫЕ ИНТЕРПРЕТАЦИОННЫЕ СПЛАЙН-МОДЕЛИ

В геологоразведочной практике часто встречаются случаи закономерного пространственного изменения плотностных и магнитных свойств горных пород. Такие изменения наблюдаются в зонах разломов, в зонах перехода от вкрапленных руд к сплошным, в областях метасоматической зональности гидротермальных месторождений, в зонах контактового метаморфизма и т.д. Закономерное уменьшение плотности в сводовых частях локальных структур установлено на востоке Русской платформы, в Западно-Сибирской низменности, в других нефтегазоносных провинциях. Изучение физических свойств на любом объекте показывает их колебание в некоторых пределах, т.е. латеральная изменчивость физических свойств горных пород наблюдается повсеместно, многочисленные примеры приведены в [5-7]. При интерпретации гравитационных и магнитных полей объектов с переменными свойствами в рамках традиционной кусочно-постоянной модели геометрические параметры разреза определяются с ошибкой в десятки и даже сотни процентов. Теоретически это доказано А.Н. Тимофеевым для латерального изменения магнитных свойств по закону Коши. Величина ошибки определяется градиентом изменения свойств. Практические примеры широко известны [4,7,9].

Традиция аппроксимировать тела переменной плотности системой элементарных тел постоянной плотности сложилась в 60-х годах, когда оснащенность геофизических предприятий вычислительной техникой была низкой, а графические и диалоговые средства, в современном представлении, не существовали. Высокая точность современной аппаратуры и хорошая геологическая изученность позволяют использовать сложные интерпретационные модели, которые в свою очередь приводят к большему извлечению информации из наблюдаемых данных.

Пространственная изменчивость физических свойств в каждой конкретной геологической обстановке имеет свой характер. Методы вычисления поля для объектов с переменными