

УДК 550.834.3

© 1991 г.

В.Б. ПИЙП

ЛОКАЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ПО ДАННЫМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ОДНОРОДНЫХ ФУНКЦИЙ

Изложены принципы построения сейсмических разрезов по данным преломленных волн на основании аппроксимации скоростных полей однородными функциями. Обсуждаются аппроксимативные возможности однородных функций в сравнении с другими скоростными функциями двух координат. Приведены примеры интерпретации полевых материалов.

Достижения современной сейсмической разведки в значительной мере основаны на использовании самой простой математической (интерпретационной) модели — однородной среды $v = \text{const}$ с одной прямолинейной границей раздела. Многослойные разрезы с криволинейными границами раздела и переменными скоростями в слоях обычно получаются путем локального применения простейшей интерпретационной модели. Опыт сейсмической разведки позволяет утверждать, что локальная аппроксимация разреза правомерна.

Вместе с тем ограниченность интерпретационной модели всегда сдерживает возможности выявления на сейсмических разрезах тех или иных структурных характеристик геологических разрезов. Например, однородно-слоистая модель среды, употребляемая при интерпретации данных МПВ, ГСЗ в 50–60-х годах, обусловила толстослойные разрезы — сейсмические разрезы с практически постоянными скоростями в слоях и субгоризонтальными границами раздела. В рамках однородно-слоистой интерпретационной модели среды невозможно получать по данным преломленных волн внутреннюю структуру слоев геологического разреза, градиенты скорости в слоях, существенно наклонные границы раздела. Резкая горизонтальная изменчивость разреза может быть выражена только сменой структурного блока. В начале 60-х годов была предложена двухмерно-неоднородная модель среды в качестве интерпретационной, с этого времени ведется интенсивная разработка решений прямых и обратных сейсмических задач для модели общего вида. Модель используется для системы годографов по профилю в целом, т.е. не локально [1]. Ее применение требует значительного объема вычислений на ЭВМ, а также очень подробных систем наблюдений. Кроме того, оказалось, что решения, получаемые этим методом, неустойчивы, а разрез в изолиниях скорости малодетален, не содержит границ раздела и волноводов.

Дальнейшая разработка этой проблемы выдвинула линеаризованную постановку двухмерной обратной задачи [2]. В настоящее время методы линеаризации обратной задачи широко применяются при интерпретации данных ГСЗ. На сейсмических разрезах, получаемых такими способами, присутствует двухмерное поле изолиний скорости, волноводы, однако при этом практически не выделяются границы раздела I и II рода. Как следствие, методы линеаризации не применяются при интерпретации данных малоглубинной сейсмоки, где требуется более детальное исследование разреза.

На этом этапе разработки методов интерпретации на основе двухмерно-неоднородной модели среды целесообразно вернуться к локальному применению интерпрета-

ционных математических моделей геологических сред, но на современном уровне, используя разработанные к настоящему времени методы решения обратных задач сейсмологии для частных классов двумерных скоростных функций.

Локальная аппроксимация разреза билинейной функцией двух координат была использована для восстановления двумерного скоростного разреза М.Е. Романовым [3]. Однако, видимо, вследствие ограниченности выбранной функции, такая методика не получила широкого применения.

К настоящему времени известны решения обратной кинематической задачи сейсмологии для некоторых двумерных классов скоростных функций. Для того чтобы охарактеризовать аппроксимативные свойства однородных функций в качестве скоростных функций, в таблице приводится сравнение однородных функций (первые три строки таблицы – функции (1), (2) и (3)) с другими функциями двух координат, не являющимися однородными, для которых также к настоящему времени известны решения обратной кинематической задачи сейсмологии. В таблице приведены только функции, относящиеся к бесконечномерным в том смысле, что их значения определяются некоторыми произвольными функциями.

В полярной системе координат уравнение однородной скоростной функции записывается в виде [4]

$$v = r^m \psi(\varphi). \quad (1)$$

В декартовой системе координат это уравнение имеет вид

$$v = (\sqrt{(x+c)^2 + y^2})^m \psi(\arctg \frac{y}{|x+c|}),$$

где x, y – декартовы координаты разреза (x – расстояние по профилю, y – глубина), m – степень однородной функции, действительное число, $-\infty < m < \infty$; c – параметр, определяющий координату точки полюса на оси x ; $\psi(\varphi)$ – произвольная функция полярного угла. Параметры m, c и таблица значений функции $\psi(\varphi)$ могут быть вычислены по двум заданным встречным годографам первых волн (рефрагированным, преломленным или головным).

Так как функция $\psi(\varphi)$ в формуле (1) есть произвольная функция, то в среде, описываемой (1), могут существовать границы раздела I или II рода (линии разрыва функции или ее производной), волноводы (области пониженных значений) и т.д. То же самое относится к другим функциям из таблицы.

Во втором столбце таблицы указана размерность функций в следующем смысле, который поясняется на примере однородных функций. Размерность однородных функций произвольной степени можно определить как $\infty + 2$. Это значит, что координате φ (φ – полярный угол, $\psi(\varphi)$ – некоторая произвольная функция, определяемая бесконечным числом коэффициентов при разложении в ряд) размерность равна ∞ , по радиальной координате r размерность равна 2, так как зависимость скорости от радиальной координаты определяется двумя параметрами: m – степенью однородной функции и c – координатой точки полюса на оси x .

Для сравнения аппроксимативных свойств приведенных в таблице классов функций в третьем столбце даны цифры, которые указывают, какие наиболее употребляемые в настоящее время интерпретационные модели среды являются частными случаями соответствующих скоростных функций. В четвертом столбце таблицы охарактеризована форма изолиний скорости, а в пятом – возможный вид границ раздела – линий разрыва скорости или ее градиентов. Изолинии скорости могут пересекать (функции (1), (3), (5), (6)) или не пересекать границы раздела (функции (1), (2), (4), (5), (6)). В соответствии с этим на локальном поле скорости вдоль границы скорость может быть или неизменной, или вдоль границы раздела может существовать градиент скорости.

Исходя из свойств, указанных в таблице, функции (1), (2), (3), (4) наиболее пригодны при интерпретации сейсмических материалов, полученных в слоистых осадочных толщах. Функции (5) и (6), описывающие локальные поля скорости, где существуют

Скоростная функция	Размерность	Частные случаи сред		Изолинии скорости	Границы раздела (линии разрыва)	Примечания	Литература
Однородная произвольной степени $v = r^m \psi(\varphi)$ (1)	$\infty + 2$	1	2	Незамкнутые кривые, подобные друг другу	Пучок прямых, сходящихся в некоторой точке профиля	Функция дана в полярных координатах, ψ – произвольная функция	[4]
Однородная нулевой степени $v = \psi(\varphi)$ (2)	$\infty + 1$	1	2	Пучок прямых, сходящихся в некоторой точке профиля	То же	Частный случай (1)	[4]
Однородная первой степени $v = r \psi(\varphi)$ (3)	$\infty + 1$	–	–	Незамкнутые кривые, подобные друг другу	”	То же	[5]
”Наклонный градиент” $v = f(ax + by)$ (4)	$\infty + 1$	1	2	Наклонные параллельные прямые	Наклонные параллельные прямые	f – произвольная функция, известна $v(x, 0)$	[6]
$v = f(x)g(y)$ (5)	2∞	2	3	Кривые произвольной формы	Горизонтальные и вертикальные прямые	f и g – произвольные функции, известна $v(x, 0)$	[7]
$v = \frac{1}{\sqrt{f^2(x) + g^2(y)}}$ (6)	2∞	2	3	То же	То же	То же	[8]
Логармоническая $\Delta \ln v = 0$ (7)	2∞	–	–	Незамкнутые кривые, особенности типа седловых точек	Отсутствуют		[9, 10]

Условные обозначения: 1 – двухслойная среда с наклонной прямолинейной границей раздела и постоянными в слоях скоростями волн, 2 – вертикально-неоднородная среда, 3 – горизонтально-неоднородная среда.

лишь вертикальные и горизонтальные границы раздела, могут найти применение при интерпретации данных, полученных в районах неглубокого расположения фундамента. Логармоничные функции (7), где линии разрыва функции или ее градиентов отсутствуют, вероятно, могут найти применение в рудной сейсморазведке.

Для того чтобы устойчиво вычислять скоростные поля методом локального приближения, обратная задача должна быть поставлена как задача аппроксимации реального поля скорости конкретной скоростной функцией. Геофизики всегда ставили и решали свои обратные задачи именно таким образом. Например, рассмотрим задачу вычисления постоянной скорости в покрывающей отражающую границу среде. Известно, что в случае однородной покрывающей среды и плоской границы раздела годограф отраженной волны – гипербола. Для ее определения достаточно знать три точки годографа и по вычисленной гиперболе установить скорость. Однако эта задача традиционно решается следующим образом. Годограф регистрируется во многих точках профиля из одного пункта взрыва и затем наилучшим образом (в смысле минимального среднего квадратического отклонения) аппроксимируется гиперболой, по которой и вычисляется скорость. В этом случае скорость определяется устойчиво.

Обратные задачи для дифференциальных уравнений в общем виде, решаемые как задачи нахождения аппроксимации неизвестного решения функцией, принадлежащей определенному множеству, поставлены В.К. Ивановым [11]. Решения, получаемые таким образом, названы им квазирешениями. Сформулированы условия устойчивости квазирешений. В смысле получения квазирешений обратная задача сейсмике для функций из таблицы поставлена только лишь для однородных функций [4, 12]. В остальных случаях априори предполагается, что реальная среда описывается заданной функцией и нужно найти лишь неизвестные параметры и коэффициенты функции. В соответствии с этим в качестве исходных данных используется лишь минимально необходимое количество наблюдений и по ним вычисляются искомые параметры. При этом никак не контролируется отклонение реальной среды от желаемой функции. Естественно, что такая постановка задачи не может быть использована для локальной аппроксимации реальных разрезов. Алгоритмы решения обратных задач для функций (4), (5), (6), (7) нуждаются в доработке в указанном смысле.

Приведем здесь некоторые особенности локальной аппроксимации разреза однородными функциями двух координат.

Представим себе слоистую среду с границами раздела I и II рода разного наклона и волноводами. На двух встречных годографах первых волн на поверхности такой среды каждой границе с положительным скачком скорости или ее градиента отвечает точка излома, границе с отрицательным скачком скорости или ее градиента – зона тени. При интерпретации годографов на основе однородно-слоистой модели среды требуется отождествить на встречных годографах особенности, отвечающие одной и той же границе раздела. До последнего времени эту процедуру не удавалось формализовать, она осуществлялась интерпретатором в рамках интерактивных систем интерпретации. Для модели среды с однородной функцией скорости, где предполагается, что границы раздела есть некоторые прямые из пучка прямых с центром в неизвестной точке профиля справа или слева от расстановки, а в слоях может присутствовать некоторый переменный вдоль границ (положительный или отрицательный) градиент скорости, операция отождествления волн, связанных с тем или иным слоем, полностью автоматизируется. Для определения параметров m и c однородной функции (1) встречные годографы подвергаются некоторым нелинейным преобразованиям и выбираются такие параметры преобразования, чтобы среднее квадратическое отклонение прямого годографа от преобразованного обратного было минимальным. Эти преобразования для двух встречных годографов с источниками в точках x_{01} и x_{02} осуществляются по формулам

$$x_2 = \frac{(x_{01} + c)(x_{02} + c)}{x_1 + c} - c, \quad t_2 = \left(\frac{x_1 + c}{x_{02} + c} \right)^{1-m} t_1,$$

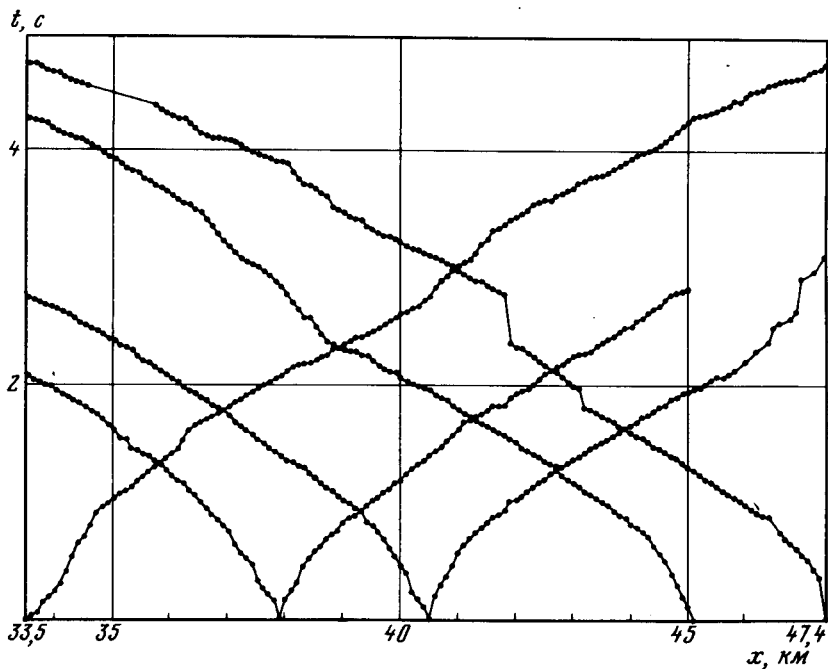


Рис. 1. Участок системы годографов по профилю в районе Ключевского вулкана (материалы ИВ ЦВО АН СССР)

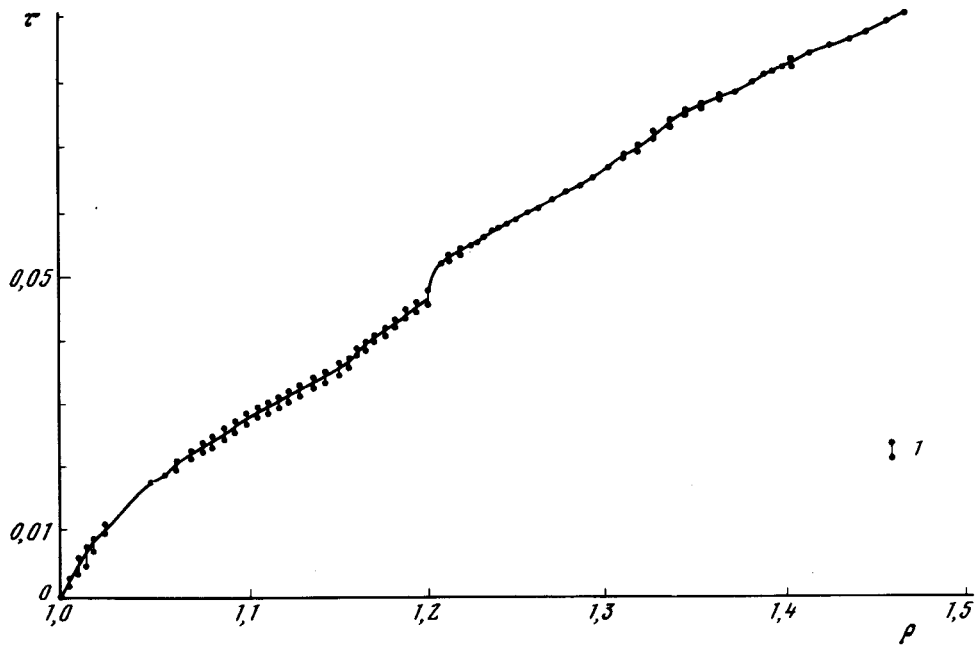


Рис. 2. Совмещенные после преобразований прямой и обратный годографы из пунктов взрыва 33.5 и 47.4. l – абсолютная величина отклонения совмещенных годографов

где x_1, t_1 и x_2, t_2 — точки прямого и обратного годографов, которые совмещаются после преобразований. Это более подробно изложено в работе [4]. При таких преобразованиях совмещаются все особенности годографов, отвечающие одной и той же границе раздела. Например, на встречных годографах из пунктов взрыва 33.5 и 47.4 (рис. 1) (профиль на Камчатке в районе Ключевского вулкана, материалы Института вулканологии ДВО АН СССР) много точек излома, присутствуют зоны тени. Отождествить их вручную на встречных годографах очень трудно. На рис. 2 представлены эти же годографы в координатах τ, ρ , совмещенные после указанных преобразований. Все звенья годографов, отвечающие одинаковым слоям разреза, удовлетворительно совпали. На рис. 2 показана абсолютная погрешность в каждой точке. Среднеквадратическое отклонение времен прямого годографа от преобразованного обратного составило 0,011 с (при задании времен на данном профиле с точностью до 0,01 с).

Для того чтобы пояснить, что такое координаты τ, ρ , указанные выше, необходимо напомнить, что несмотря на то, что однородные функции являющиеся двухмерными в том смысле, что скорость в соответствующих средах зависит от двух координат, годографы, им отвечающие, могут быть трансформированы в годографы для некоторой одномерной среды, где скорость есть функция только полярного угла α . Эту трансформацию можно совершить по формулам [4]

$$\rho = r^{1-m}, \quad \alpha = |1 - m| \varphi, \quad \tau = |1 - m| t.$$

Эти формулы используются при численном решении обратной задачи.

Локальная аппроксимация разреза однородными функциями в случае детальной системы наблюдений осуществляется следующим образом. Для каждой пары встречных годографов обратная задача решается автономно — вычисляется локальное поле скорости, ограниченное предельным лучом, соединяющим пункты взрыва. Локальные поля скорости объединяются на общей плоскости разреза способом наложения, так что верхняя часть разреза определяется по самым коротким парам годографов, а нижние части — по все более длинным. Эта методика проверена на модели [4]. Степень совпадения значений скорости в точках пересечения локальных полей характеризует точность вычисления разреза. Локальное применение модели среды с однородной функцией скорости для достаточно подробной системы наблюдений позволяет получить на сейсмических разрезах практически произвольную функцию двух координат с протяженными криволинейными линиями разрыва скорости или ее производных — границами раздела и протяженными областями пониженных значений — волноводами [12–14]. Сейсмические разрезы в различных регионах страны, вычисленные таким образом, проверялись решением прямой задачи. Среднеквадратическое отклонение вычисленных значений времен от наблюдаемых всегда лежат вблизи точности задания времен на данном профиле [13, 14]. Сейсмический разрез (рис. 3) по короткому профилю на Камчатке в окрестности вулкана Авачинская сопка (материалы Института вулканологии АН СССР) может служить иллюстрацией конструирования общего поля скорости из локальных полей скорости и примером устойчивого решения обратной задачи с использованием однородных функций. Суммарный разрез состоит из трех локальных полей скорости, на рис. 3 показаны предельные лучи. Две короткие пары встречных годографов определяют верхнюю часть разреза. По длинной паре годографов определена нижняя часть разреза. Между локальными полями скорости, отвечающими расстановкам 0–6 и 6–10, в треугольной области ABC , разрез определен с помощью линейной интерполяции по горизонтали. По линии $FACK$ "короткие" локальные поля наложены на локальное поле, отвечающее расстановке 0–10 без какого-либо сглаживания. Хорошее совпадение значений скорости вдоль этой линии говорит об устойчивости решения обратной задачи. Совпадение максимальных глубин предельных лучей для расстановок 0–6 и 0–10 и прямолинейный участок луча 0–10 свидетельствуют о том, что скорость ниже линии NFM не возрастает, предельный луч для расстановки 0–10 скользит по кровле фундамента. По изолинии 6,0 можно ограничить высокоскоростную интрузию, которая здесь присутствует по данным геологии. Несовпадение значений скоростных полей вблизи поверхности в районе пикета 6 обус-

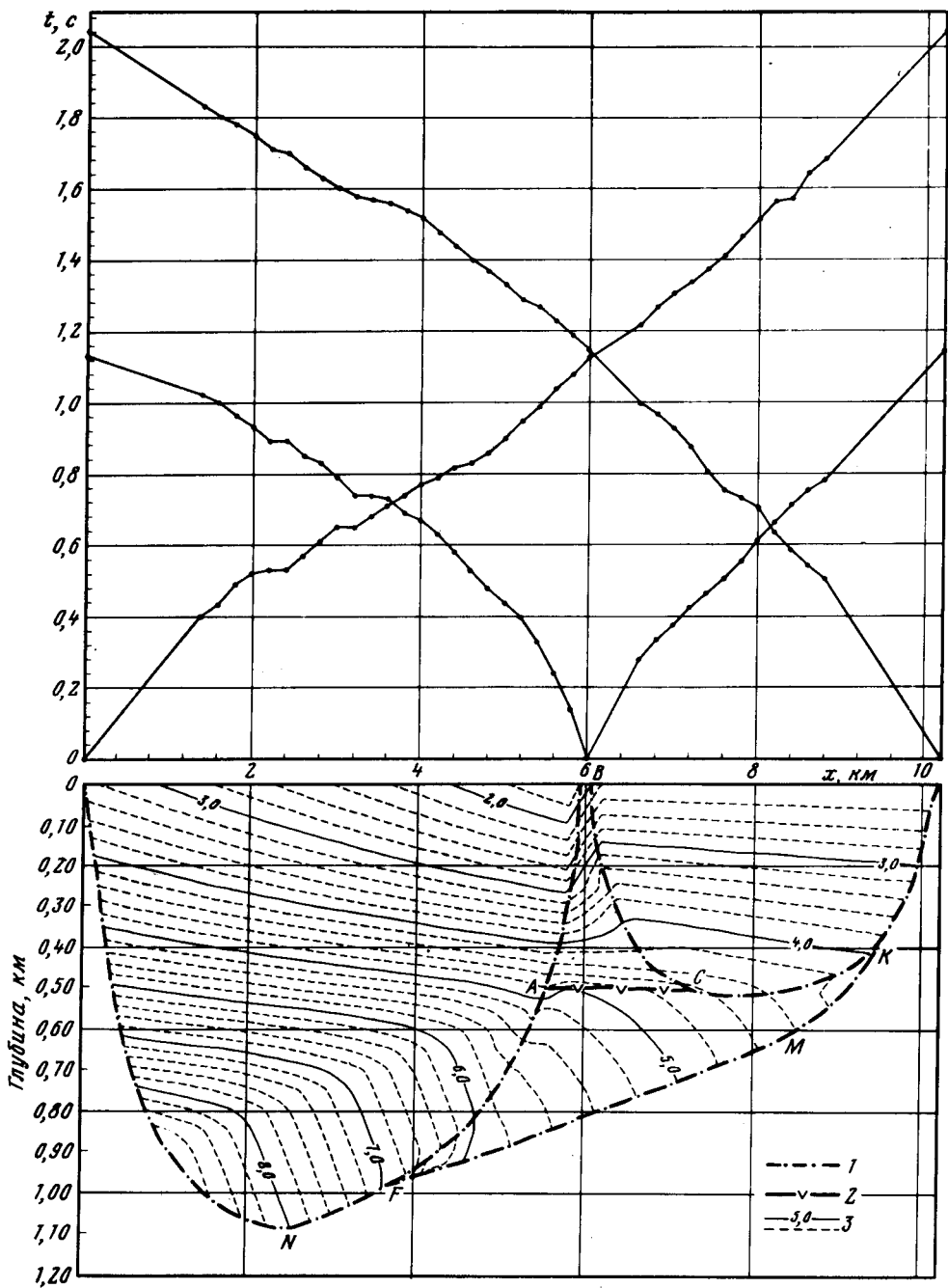


Рис. 3. Годографы (а) и разрез (б) по профилю на Камчатке: 1 — предельные лучи, 2 — нижняя граница области интерполяции, 3 — изолинии скорости

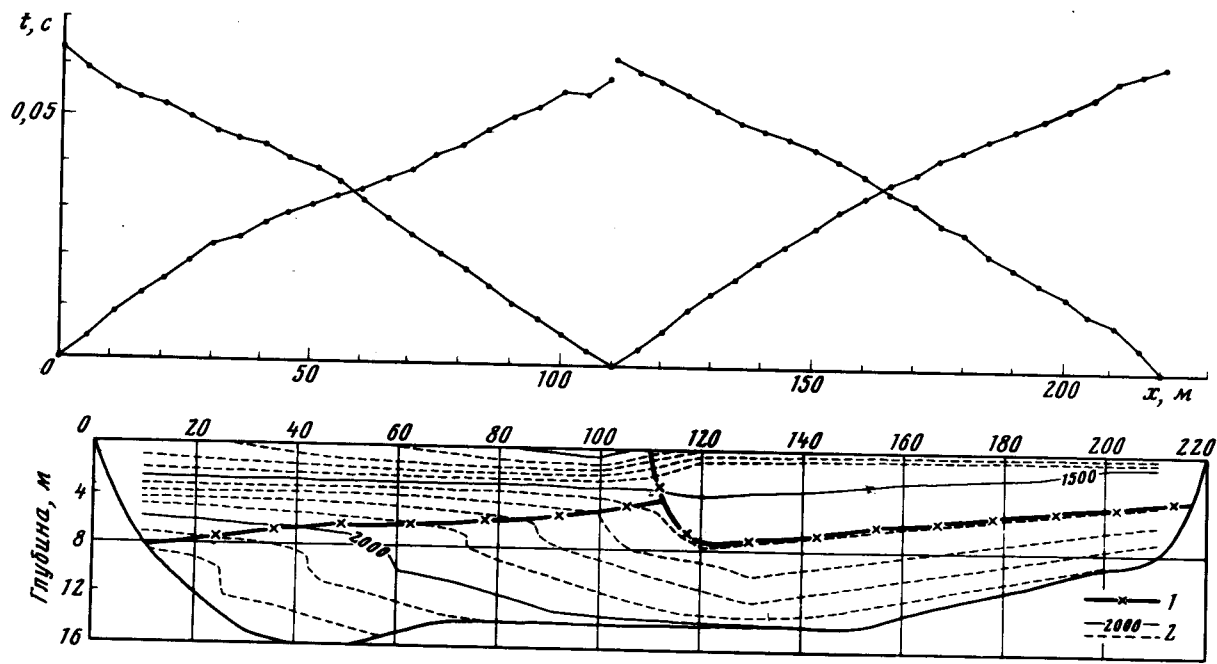


Рис. 4. Годографы (а) и разрез (б) по профилю 128 (Вьетнам): 1 – границы раздела второго рода, 2 – изолинии скорости

ловлено разницей в наблюдаемых значениях кажущихся скоростей для правой и левой ветвей годографов в точке источника б. Вероятно, здесь имеется тектоническое нарушение.

Разрез по данным инженерной сейсмологии во Вьетнаме¹ (рис. 4) иллюстрирует возможность автоматического выделения границ раздела. Речная сейсморазведка в районе Хоа Бинь проводилась по методике МПВ. Годографы первых волн по профилю 128 (рис. 4) криволинейны, не имеют четко выраженных особенностей. В правой части разреза выделяется практически однородный слой воды со скоростью 1500 м/с глубиной 6–7 м. В левой части разреза (сухое русло реки) получен градиентный слой речных отложений с увеличивающейся с глубиной влажностью, о чем свидетельствуют скорости от 1000 до 1800 м/с. Ниже по всему разрезу от глубин 6 до 16 м расположен относительно слабоградиентный слой водонасыщенных речных отложений со скоростями $1800 \leq v \leq 2200$ м/с. Выделенные на разрезе границы раздела являются границами раздела второго рода.

Разрезы, получаемые с использованием модели среды с однородной функцией скорости, значительно более детальны и информативны, чем при использовании традиционных моделей среды, по следующим причинам: 1) использование более общей двухмерно-неоднородной бесконечномерной модели среды; 2) более полное использование наблюдаемых годографов; используются все пары встречных годографов, зарегистрированных на профиле; 3) полная автоматизация интерпретации и построения разреза.

Список литературы

1. Белоносова А.В., Алексеев А.С. Об одной постановке обратной кинематической задачи сейсмологии для двумерной непрерывно-неоднородной среды // Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1967.
2. Алексеев А.С., Лаврентьев М.М., Мухометов Р.Г., Романов В.Г. Численный метод решения трехмерной обратной кинематической задачи сейсмологии // Математические проблемы геофизики. Вып. 1. М.: Наука, 1969.
3. Романов М.Е. Метод характеристик численного решения обратной кинематической задачи сейсмологии // Математические проблемы геофизики. Вып. 3. Новосибирск, 1972.
4. Пийп В.Б. Новые методы интерпретации сейсмических временных полей в средах с переменными скоростями // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1984. № 3. С. 83–92.
5. Пийп В.Б. Упрощенный способ построения разреза в изолиниях скорости по годографам первых волн // Прикладная геофизика. 1982. Вып. 105. С. 82–88.
6. Вавилова Т.И. Решение обратной кинематической задачи для случая наклонного градиента скорости распространения упругих волн // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. IV. Л., 1962.
7. Медведев С.Н. К обратной двумерной кинематической задаче сейсмологии для двумерной среды // Вопросы геологии и геофизики окраинных морей северо-западной части Тихого океана. Владивосток, 1974.
8. Аниконов Ю.Н. Несколько частных решений обратной кинематической задачи // Математические проблемы геофизики. Вып. 4. Новосибирск, 1973. С. 30–61.
9. Облогина Т.И. Об одной обратной задаче геометрической сейсмологии неоднородных сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 5.
10. Юдакин Л.А. Решение обратной кинематической задачи сейсморазведки для двух годографов в некотором бесконечномерном классе двумерно-неоднородных сред // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1986. № 4. С. 63–72.
11. Иванов В.К. О некорректно поставленных задачах // Мат. сб. 1963. Т. 61. № 2. С. 211–223.
12. Пийп В.Б., Ефимова Е.А. Исследование разрезов с волноводами на основе модели среды с однородной функцией скорости сейсмических волн. Численные методы геофизики – теория и приложения // Сб. научн. тр. ВЦ СО АН СССР. Новосибирск, 1987. С. 99–109.
13. Пийп В.Б., Ефимова Е.А. Определение детальных скоростных полей по материалам инженерной сейсморазведки // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1985. № 3. С. 51–56.
14. Пийп В.Б., Кузуб О.В., Алексинская Е.В., Крылов Д. Детальные двумерно-неоднородные сейсмические разрезы по преломленным волнам на территории Москвы // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 1988. № 4. С. 66–72.

¹ Нгуен Ван Туи. Повышение эффективности геофизических работ при инженерно-геофизических исследованиях скальных оснований во Вьетнаме на примере гидроузла Хоа Бинь на реке Да: Автореф. дис. . . . канд. геол.-минералог. наук. М.: МГУ, 1985.