

УДК 550.834

## Определение скоростной характеристики верхней части сейсмического разреза

*А.В. Кузнецова*

Санкт-Петербургский Государственный Университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9,  
e-mail: marianna@geo.phys.spbu.ru

**Аннотация.** Рассматривается распространение рефрагированных волн в горизонтально-однородной и горизонтально-неоднородной двумерных средах. Дается описание годографов для вышеупомянутых моделей сред. Излагается решение обратной кинематической задачи в акустической среде – поиск параметров скоростной функции, аппроксимирующей сейсмический разрез, отвечающих минимуму среднеквадратичного отклонения времен пробега экспериментального годографа от теоретического годографа. Экспериментальный годограф был получен путем расчета по аналитическим формулам с добавлением гауссова шума. В ходе работы было показано, что использование рефрагированных волн позволяет на основе временного разреза определять распределение скорости в среде. Таким образом, метод рефрагированных волн может быть использован для определения вида скоростной функции, описывающей распределение скоростных параметров в среде.

**Ключевые слова:** рефрагированные волны, верхняя часть сейсмического разреза.

## Determination of velocity characteristics of a near surface seismic section by diving waves method

*A.V. Kuznetsova*

Saint Petersburg State University,  
7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia  
e-mail: marianna@geo.phys.spbu.ru

**Abstract.** In the article we consider the propagation of diving waves in horizontally-homogeneous and horizontally-inhomogeneous two-dimensional media. Also the description of hodograph for such models of media is considered. We present a solution of the inverse kinematic problem in the acoustic environment what is the search of the velocity function parameters approximating geological seismic cross-section. The found parameters meet the minimum standard deviation of theoretical and experimental hodograph. Experimental hodograph was obtained by the calculation of analytical formulas with the addition of Gaussian noise. It was shown that the use of diving waves makes it possible to determine the velocity distribution in the media. Thus, the method of diving waves can be used to determine the type of velocity function describing the distribution of the velocity parameters in the medium.

**Keywords:** diving waves, near surface seismic section.

## Введение

При обработке и интерпретации данных геофизических исследований в последнее время все большее внимание уделяется разработке методов, позволяющих исключить влияние приповерхностных неоднородностей верхней части разреза (ВЧР), которое отрицательно сказывается на информативности получаемых данных. ВЧР представляет собой комплекс осадочных пород, слагающих разрез от земной поверхности до первого опорного сейсмического горизонта. Мощность верхней части разреза может превышать 1000 – 1500 метров. С связи с изменчивостью скоростных параметров ВЧР можно рассматривать как градиентный слой, в котором упругие свойства непрерывно изменяются с глубиной [1].

I. Сейсмические лучи в таких средах распространяются по искривленным траекториям. На рис. 1 изображены лучевая схема и годограф рефрагированной волны, распространяющейся в сейсмической модели, где скорость возрастает линейно с глубиной. Пусть на некоторой глубине располагается источник S. Лучи, обозначенные на рисунке разным цветом, соответствуют разным углам выхода из источника. Угол выхода определяется как угол между вертикалью и касательной к лучу в этой точке.

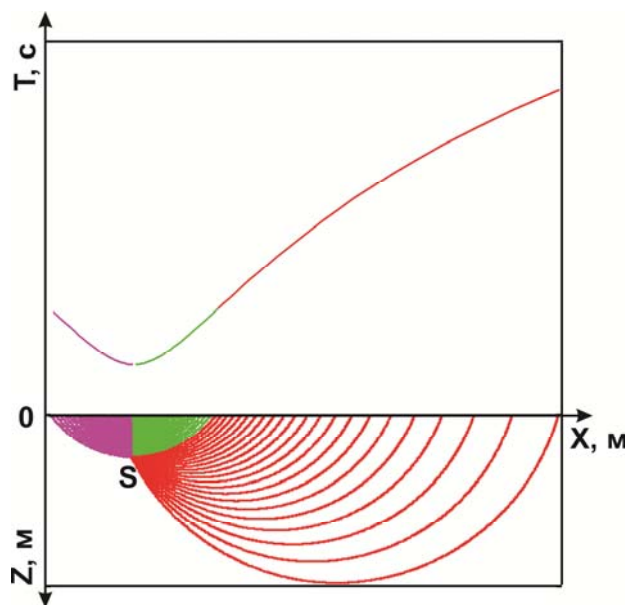


Рис. 1. Траектории лучей и годограф рефрагированных волн в градиентной среде.

Для описания распространения рефрагированных волн использовалась система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} \vec{r} = V^2 \vec{p} \\ \frac{d}{d\tau} \vec{p} = -\frac{1}{V} \nabla V \end{cases} \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  – расстояние, которое проходит луч,  $\vec{p}$  – вектор медленности,  $V$  – скорость в среде. Известно, что данная система уравнений справедлива для лучей, распространяющихся как в однородных, так и в неоднородных средах [2].

Для горизонтально-однородной среды, где скорость возрастает с глубиной  $z$  линейно  $V = V_0(1 + kz)$ , вышеупомянутую систему уравнений можно решить аналитически (при условии, что градиент скорости положительный  $k > 0$ ). При помощи математических преобразований, описанных в бакалаврской работе, получается система двух параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = \int_{Z_s}^{Z_r} \frac{p_x V(z) dz}{\sqrt{1 - V^2(z) p_x^2}} \\ \tau = \int_{Z_s}^{Z_r} \frac{dz}{V(z) \sqrt{1 - V^2(z) p_x^2}} \end{cases} \quad (2)$$

где  $x$  – горизонтальное расстояние, которое проходит луч,  $\tau$  – время, за которое луч проходит расстояние  $z$ ,  $p_x = \frac{\sin \alpha(z)}{v(z)} = const$  – компонента вектора медленности, сохраняющаяся вдоль луча,  $Z_s$  – координата источника,  $Z_r$  – координата приемника. Предположим, что источник и приемник находятся на дневной поверхности (т.е.  $(x_s, z_s) = (0, 0)$  и  $(x_r, z_r) = (x, 0)$ ), тогда после интегрирования получаем преобразованную систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x(p_x) = \frac{2}{kV_0} \ln \left| \frac{1 - \sqrt{1 - V_o^2 p_x^2}}{V_o p_x} \right| \\ \tau(p_x) = \frac{2}{kV_0 p_x} \sqrt{1 - V_o^2 p_x^2} \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены годографы, рассчитанные с использованием последней системы уравнений. Видно, что при смещении источника рефрагированных волн вдоль горизонтальной оси форма годографа не изменяется, что соответствует нашим представлениям о горизонтально-однородной среде.

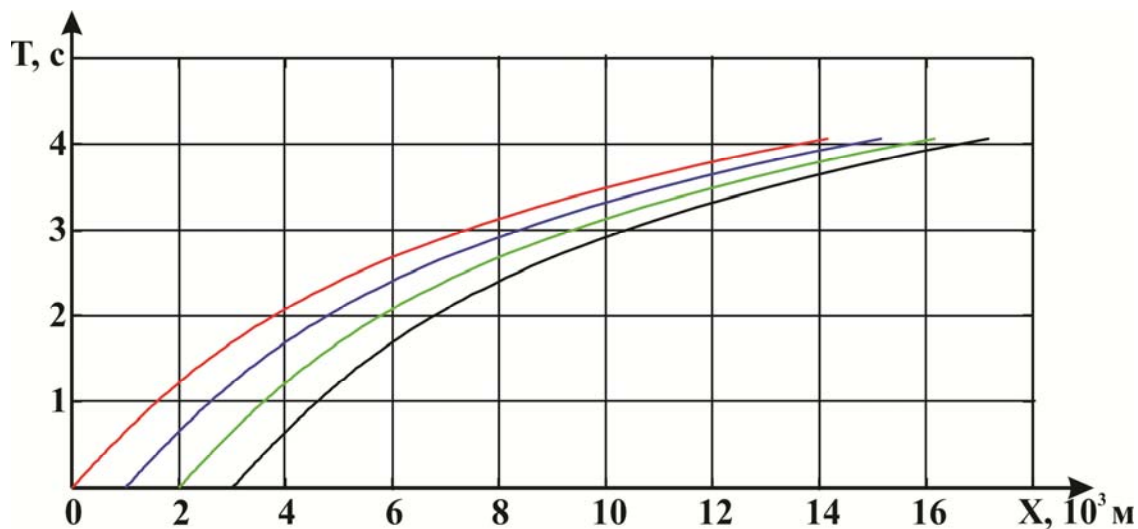


Рис. 2. Годографы рефрагированных волн, распространяющихся из четырех источников в градиентной среде.

Известно, что для рассматриваемого распределения скорости уравнение годографа записывается не только в параметрическом виде. Однако в данной работе используется параметрический вид для рассмотрения горизонтально неоднородной среды.

II. Представляет интерес модель слоя, в котором скорость распространения волн изменяется линейно как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Функция скорости в этом случае имеет вид  $V = V_0(1 + ax + bz)$ . Можно заметить, что при этом, величина горизонтальной составляющей градиента скорости меньше, чем величина вертикальной составляющей ( $a < b$ ).

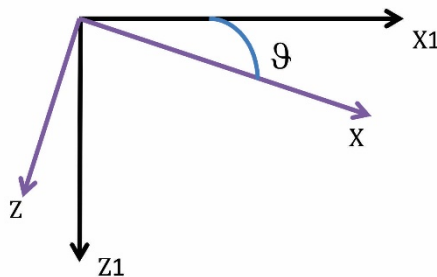
Для получения аналитического решения системы дифференциальных уравнений (1) в случае горизонтально-неоднородной среды следует сделать некоторые математические преобразования [3]:

1. Прежде всего, осуществляется переход из исходной системы координат  $(x, z)$  в новую систему координат  $(x_1, z_1)$  по правилу:

$$x_1 = bx - az$$

$$z_1 = ax + bz,$$

где  $a = c \cdot \sin \theta$ ,  $b = c \cdot \cos \theta$ ,  $c$  – градиент скорости в новой системе координат. На рис. 3 изображена схема поворота исходной системы координат на угол  $\theta$ . После таких преобразований исходная скоростная функция является функцией только одной вертикальной координаты  $z_1$ :  $V = V_0(1 + cz_1)$ .



**Рис. 3.** Поворот системы координат.

2. Расчет горизонтального расстояния  $x_1$ , которое проходит луч, и времени  $\tau$ , за которое луч проходит расстояние  $x_1$ , осуществляется по параметрическим уравнениям (2).

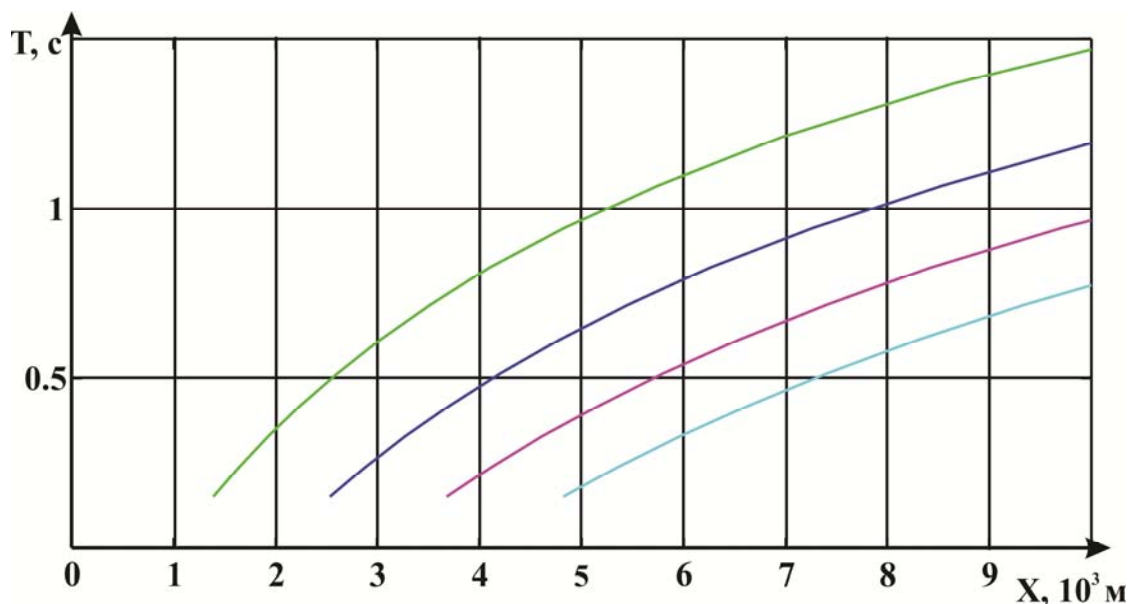
3. Для построения годографов рефрагированных волн необходимо сделать переход из системы координат  $(x_1, z_1)$  в исходную систему координат  $(x, z)$ :

$$x = \frac{az_1 + bx_1}{a^2 + b^2}$$

$$z = \frac{bz_1 + ax_1}{a^2 + b^2}$$

По изложенной схеме были сосчитаны годографы рефрагированных волн, распространяющихся в горизонтально-неоднородной среде (рис. 4). При смещении

источника вдоль горизонтальной оси форма годографа изменяется, что соответствует представлениям о неоднородности рассматриваемой среды по горизонтали.

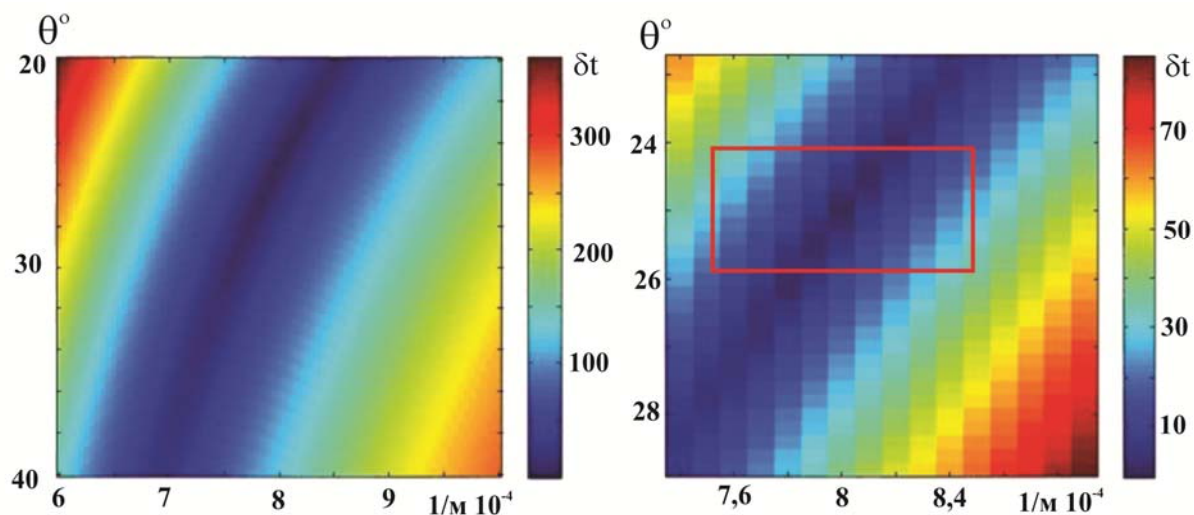


**Рис. 4.** Годографы рефрагированных волн, распространяющихся из четырех источников в горизонтально-неоднородной среде.

III. На следующем этапе работы рассматривалась обратная кинематическая задача: восстановление скорости в неизвестной среде по известным годографам. Считалось, что в неизвестной среде скорость является линейной функцией двух координат, поэтому для определения скоростной функции необходимо знать градиент скорости вдоль каждой из координат коэффициенты  $a$  и  $b$ . Для решения задачи была задана сетка параметров, и в каждой точке на плоскости параметров рассчитывалось время прихода и горизонтальное расстояние для рефрагированных волн. Затем, методом наименьших квадратов по формуле (4) определялось, какая пара параметров наилучшим образом соответствует исходным данным.

$$\delta\tau^2(c, \theta) = \sum_i (\tau_i(c, \theta) - t_i)^2 \quad (4)$$

На рис. 5 изображена сетка параметров и разница времен рассчитанного и экспериментально полученного годографа. На рис. 5 справа красный квадрат выделяет область параметров, при которых достигается глобальный минимум. После чего параметры и  $\theta$  переводятся в  $a$  и  $b$ , откуда можно найти вид скоростной функции.



**Рис. 5.** Поиск параметров скоростной функции.

В ходе работы наряду с исследованием теории рефрагированных волн был разработан программный код на языке Matlab, для нахождения времен прихода рефрагированных волн, распространяющихся как в горизонтально однородной, так и в горизонтально-неоднородной средах. Для нахождения параметров скоростной функции, описывающей распределение скорости в неизвестной среде, был применен метод перебора, основанный на минимуме среднеквадратичного отклонения времен прихода рефрагированных волн.

### **Благодарность**

Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории динамики упругих сред СПбГУ Б.М. Каштану (заведующему Лабораторией динамики упругих сред СПбГУ, профессору, д.ф.-м.н., научному руководителю), а также Д.В. Аникиеву (к.ф.-м.н., инженеру-исследователю) за многочисленные конструктивные предложения, полезные обсуждения и советы в ходе выполнения работы.

### **Литература**

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: АИС. 2006. 744 с.
2. Петрашень Г.И. Распространение волновых полей сигнального типа в упругих сейсмических средах. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та. 2000. 452 с.

3. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. Гурвича И.И., Номоконова В.П. – М.: Недра. 1981. 464 с.

## References

1. Boganik G.N., Gurvich I.I. Seismorazvedka [Seismic]. Tver AIS. 2006. 744 p.
2. Petrashen G.I. Rasprostranenie volnovykh poley signalnogo tipa v uprugih seismihseskih sredah [Distribution of wave fields of signal type elastic seismic environments]. SPb.: Publishing House, St. Petersburg. Univ. 2000. 452 p.
3. Seismorazvedka. Spravochnik geofizika [Seismic. Directory of geophysics] / edited. Gurvich I.I., Nomokonova V.N.- М.: Nedra. 1981. 464 p.

## Рекомендуемая ссылка на статью:

*Кузнецова А.В.* Определение скоростной характеристики верхней части сейсмического разреза // Геофизические методы исследования Земли и ее недр. 2016. С. 68–75. DOI: 10.13140/RG.2.1.3167.0000

## How to cite:

*Kuznetsova A.V.* Determination of velocity characteristics of a near surface seismic section by diving waves method, *Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil*, **2016**, 68–75. DOI: 10.13140/RG.2.1.3167.0000