

# **ПРИМЕНЕНИЕ ЛУЧЕВОГО МЕТОДА В ЗАДАЧЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ И РЕКОНСТРУКЦИИ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ ВСП.**

А. В. Решетников, В. В. Решетников, А. А. Табаков, В.Л. Елисеев

## **Аннотация**

В статье представляется новая методика обработки и интерпретации данных сейсморазведки ВСП для моделей неоднородных сред с кусочно-гладкими границами.

Проводится сопоставление годографов и амплитуд прямой волны, рассчитанных лучевым методом и снятых с поля, вычисленного методом конечных разностей.

Демонстрируется декомпозиция волновых полей, полученных конечноразностным методом.

## **Введение**

Как правило, процессы обработки и интерпретации данных сейсморазведки разделены во времени и выполняются различными пакетами программ. При этом доступная информация используется далеко не в полном объеме, что связано, главным образом, с использованием упрощенных подходов при обработке сейсмических полей.

В настоящее время наибольшее распространение при решении задач построения изображений геологического разреза получили методы, основанные на лучевых и различных миграционных преобразованиях, но каждый из таких методов в отдельности обладает рядом серьезных недостатков. При этом для построения изображений используется, как правило, не волновое поле в целом, а выделенная из всего поля информация определенного рода, например, поля продольных отраженных волн.

Кроме того, во многих случаях используются сильно упрощенные модели среды (такие как плоские границы разделов, отсутствие градиентов скоростей и т.д.), что приводит к большим погрешностям при интерпретации.

В предлагаемой статье представляется новая методика обработки и интерпретации данных сейсморазведки ВСП в сложно-построенных средах, состоящих из связной системы произвольно-неоднородных тел с кусочно-гладкими границами.

Регулярные волны различных типов и кратностей последовательно вычитаются из исходного поля, в качестве которого использовалось трехкомпонентное поле рассчитанное в точках скважины конечноразностным методом, и проектируются на изображение с использованием опорной модели. Причем для вычитания используются голографы и амплитуды, рассчитанные по начальной модели среды в рамках лучевого метода [2], [4]-[7], [10].

Полученное изображение можно использовать для уточнения начальной модели, что может служить основой для следующей итерации на пути подбора модели адекватной волновому полю.

В дальнейшем этот метод будем называть методом динамической декомпозиции и реконструкции (ДДР) [8].

Технология Динамической Декомпозиции волновых полей и Реконструкции модели среды (ДДР) основана на подборе в процессе обработки модели среды, которая обеспечивает декомпозицию сейсмического волнового поля с минимальными остатками.

В статье освещены ключевые элементы методики ДДР:

1. Расчет лучей в неоднородных средах с кусочно-гладкими границами.
2. Декомпозиции волновых полей ВСП с использованием лучевого моделирования.
3. Схема построения изображений околоскважинного пространства.

### **Формулировка задач**

Для реализации метода ДДР необходимо решить следующие задачи:

1. Построение модели среды, удовлетворяющей условиям лучевого метода.
2. Расчет кинематических и динамических характеристик волн в средах с изменяющимися градиентами скоростей.
3. Оценка формы волны.
4. Проектирование выделенной волны на разрез.
5. Уточнение модели среды.

### **Описание модели среды**

В методе модель среды реализуется в наиболее общем виде, представляющем собой систему связанных тел с границами, описываемыми кусочными параметрическими сплайнами со сглаживанием [9]. Критерием сглаживания границ тел является ограничение на максимальную кривизну. Каждое из тел предполагается произвольно неоднородным.

Геометрическая модель среды задается наборами точек, лежащих на кусочно-гладких границах раздела. Для дальнейших расчетов гладкие границы аппроксимируются параметрическими кубическими сплайнами, что допускает описание неоднозначных границ. Условие аппроксимации – максимальная кривизна границ не превышает заданного порога.

Физические параметры каждого слоя описываются переменными вдоль границ пласта скоростями продольных и поперечных волн, их вертикальными градиентами и плотностями.

Дальнейшие расчеты проводились для модели среды изображенной на рис. 1.

Для реализации метода выбрана система наблюдений в криволинейной скважине из двух пунктов возбуждения. Шаг наблюдений – 20 м. Удаление от устья скважины – 2500 м и -2500 м (рис.2).

## Расчет модельных волновых полей

Модельные волновые поля рассчитывались методом конечных разностей на сетке с шагом 2 м. Источник рассчитывался аналитически в радиусе 100 м. Импульс возбуждения в интервале 0-50 Гц. С преобладающей частотой 25 Гц. Высокочастотные шумы на сетке составляли не более 10% в полосе частот 0-62.5-125 Гц. Обратное рассеяние волн на границах модели составляло не более 0.5%. Пример волнового поля приведен на рис. 3.

### Слежение лучей в градиентных средах с кусочно-гладкими границами

В рамках рассматриваемой модели среды была разработана методика слежения луча, использующая локально-точные решения уравнения эйконала [7]. Так как в общем случае градиенты скоростей не постоянны, то слежение луча проводится пошагово. Направление и величина шага выбираются исходя из учета параметров среды в начальной точке. Шаг определяет хорду  $n_i$  окружности, являющейся истинной траекторией. Первый шаг делается по хорде  $n_0$ , составляющей угол  $F$  с направлением луча (величина  $F$  является параметром задачи и определяет точность ее решения, чем она меньше, тем рассчитанная траектория луча меньше отличается от дуг окружностей).

Величины хорд рассчитываются по формуле

$$H_i = 2 R_i \operatorname{tg} F,$$

где

$$R_i = \left| \frac{V_{x_i, z_i}}{k_{x_i, z_i} \sin \alpha_i} \right| \quad (i=0, 1, \dots, N),$$

$x_i, z_i$  - начальная точка  $i$ -й хорды,

$v_{x_i, z_i}$  - скорость продольной волны,

$k_{x_i, z_i}$  - модуль градиента,

$\theta_{x_i, z_i}$  - направление касательной к траектории луча.

$\alpha_{x_i, z_i}$  - направление градиента

Направляющий угол первой хорды равен  $\theta_0 + F$ , где  $\theta_0$  - начальный угол, под которым был запущен луч. Каждая из последующих хорд поворачивается на угол  $2F$  относительно предыдущей против часовой стрелки, если проекция вектора градиента на ось  $Z$  больше нуля и в противоположном направлении в противном случае. Касательная к лучу поворачивается от точки к точке в том же направлении и на тот же угол, что и хорда.

Координаты концов хорд вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + H_0 \sin \Psi_0 & x_2 &= x_1 + H_1 \sin \Psi_1 & x_{i+1} &= x_i + H_i \sin \Psi_i \\ z_1 &= z_0 + H_0 \cos \Psi_0, & z_2 &= z_1 + H_1 \cos \Psi_1, & \dots, & z_{i+1} &= z_i + H_i \cos \Psi_i \\ \Psi_0 &= \theta_0 \pm F_0 & \Psi_1 &= \theta_1 \pm F_1 & \Psi_{i+1} &= \theta_{i+1} \pm F_{i+1} \end{aligned}$$

Так как среда может иметь в своем составе несколько геологических тел, на границе этих тел необходимо учитывать отражение или преломления луча в зависимости от того, какая волна рассматривается – отраженная или преломленная [1].

В точке пересечения хорды луча и границы двух геологических тел, определяется касательная к границе. Далее вычисляется касательная к границе компонента вектора рефракции падающего луча заданного типа. По закону Снеллиуса при преломлении и отражении луча эта компонента должна сохраняться. По этой сохраняющейся компоненте рассчитывается нормальная к границе компонента вектора рефракции преломленного или отраженного луча. Этот способ обобщается и на случай обменных волн, т. е. когда при отражении/преломлении волна меняет тип с продольного на поперечный или наоборот.

Пусть падающий луч волны  $\nu$ -го типа (продольная или поперечная) пересек границу в определенной точке. Известны вектор рефракции  $\mathbf{p}^{\nu}_{in} = \frac{\mathbf{n}}{v_{\nu}}$ , и вектора касательной  $\mathbf{m}$  и внешней нормали  $\mathbf{N}$  к границе пересекаемого геологического тела.

Раскладываем вектор рефракции падающей волны на нормальную и касательную составляющие:

$$\mathbf{p}^{\nu}_{in} = p^{\nu}_{\parallel} \mathbf{m} + p^{\nu}_{ort} \mathbf{N}$$

Из закона сохранения касательной компоненты:

$$p^{\nu}_{\parallel} = p^{\mu}_{\parallel}$$

легко выразить нормальную компоненту вектора рефракции отраженной/преломленной волны:

$$p^{\mu}_{ort} = \pm \frac{\sqrt{1 - \frac{p^{\nu}_{\parallel}{}^2}{v_{\mu}^2}}}{v_{\mu}}$$

В итоге получаем полный вектор рефракции волны (а, следовательно, и направление луча) после пересечения границы.

$$\mathbf{p}^{\mu}_{out} = p^{\mu}_{\parallel} \mathbf{m} + p^{\mu}_{ort} \mathbf{N}$$

Для каждой точки луча ( $M$ ) можно рассчитать амплитуду волны в нулевом приближении лучевого метода [4]:

$$A(M) = \frac{1}{\sqrt{L(M)}} \prod_{i=1}^n \chi_i \prod_{k=0}^{n-1} \sqrt{\frac{\rho_{k+1} v_{k+1} \cos \theta_{k+1}}{\rho_k v_k \cos \theta_k}}$$

Здесь:

- $\chi_i$  - коэффициент преломления/отражения луча на  $i$ -й границе
- $n$  - число границ, пересекаемых лучом до точки наблюдения
- $\theta_i$  - углы падения и отражения (преломления) на границе

$v_i$  - скорости над и под точкой пересечения луча и границы

$\rho_i$  - соответствующие плотности.

$L(M)$  - геометрическое расхождение лучевой трубки в точке  $M$

Для расчета геометрического расхождения необходимо пустить дополнительные лучи с начальными углами  $\theta_0 + d\theta$  и  $\theta_0 - d\theta$ , где  $\theta_0$  - начальный угол луча, а  $d\theta$  - небольшое приращение. Геометрическое расхождение определялось как отношение диаметра лучевой трубки (расстояния между боковыми лучами) вблизи приемника к углу  $2d\theta$ .

### Расчет параметров волн

Задача расчета характеристик волны заданного типа сводится к отысканию углов, под которыми надо рассчитать лучи (с кодом заданной волны), чтобы они попали во все доступные сейсмоприемники. Если такие лучи найдены, то по их траектории можно рассчитать время прихода волны и амплитуду в точке сейсмоприемника. Таким образом, метод позволяет получить амплитуды, годографы и поляризационные параметры волн произвольного типа.

Пример лучей преломленных и проходящих волн изображен на рис. 4, соответствующие им годографы, наложенные на модельное поле после деконволюции, представлены на рис. 5.

Для иллюстрации качества расчета параметров поляризации, исходное XYZ поле было повернуто в поляризацию обменной преломленной PS волны от первой границы. На рис. 6 изображены R и P компоненты полученного поля. На рисунке хорошо видно, что поперечная волна полностью перешла в R компоненту, это свидетельствует о том, что полученные кинематические и поляризационные параметры волны достаточно точно соответствуют модельному полю.

## **Выделение и вычитание волн, построение изображений**

Зная годограф и поляризационные параметры волны, появляется возможность вычесть ее из полного волнового поля оптимальным образом. Проводя последовательно вычитание волн в порядке убывания амплитуд, можно добиться полного разбора поля вплоть до волн больших кратностей.

Применение лучевого метода расчета параметров волн, позволяет по вычтенной волне легко построить соответствующее ей изображения, т. к. точки отражения определяются уже на этапе трассирования. На рис. 7 представлено изображение, полученное по выделенной обменной проходящей PS волне.

## **Технология ДДР**

Технология обработки данных ВСП по методике ДДР [8] состоит из нескольких процедур:

1. Построение первого приближения модели среды в результате решения обратной кинематической задачи по годографам и поляризациям всех визуально коррелируемых волн.
2. Для каждой волны от каждой границы модели выполняется расчет модельной волны с временем, амплитудами и поляризацией.
3. Выполняется оценка формы волны вдоль расчетного годографа с использованием расчетного распределения амплитуд и поляризации.
4. Выделенная волна вычитается из исходного поля и проектируется в точки рассеяния на изображение с пересчетом на коэффициент отражения продольной волны по внешней нормали к границе. Волны разных типов от одной точки границы накапливаются с весами, пропорциональными их амплитуде. Процесс повторяется



для всех типов волн и всех границ, пока на волновом поле не останется регулярных волн. Обрабатываются не только однократные, но и кратные волны.

После получения изображения опорная модель может быть уточнена и процесс повторяется, пока изображение с необходимой точностью не будет соответствовать модели.

### **Выводы**

- В рамках технологии ДДР разработаны эффективные методы описания произвольных двумерных сред и методы расчета лучей в средах с переменными градиентами скоростей.
- Правильность расчета лучей в описанных средах подтверждается хорошим совпадением с результатами конечно-разностного моделирования.
- Технология ДДР позволяет итеративно решать двумерную обратную задачу для векторных волновых полей, совмещая и совершенствуя как процессы обработки (векторная селекция волн), так и вопросы интерпретации - построение изображения среды.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность компании SEPTAR, предоставившей модель по которой выполнено сопоставление конечно-разностных и лучевых методов.

### **Литература**

1. Г. И. Петрашень. Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л., 1978г., 247с.

2. Г. И. Петрашень. Распространение сейсмических волновых полей в слоистых средах. Часть I //Интерференционные волны в слоистых средах. 4. - СПб., 2001г., стр. 295.
3. Г. И. Петрашень. Распространение сейсмических волновых полей в слоистых средах. Часть II. //Интерференционные волны в слоистых средах. 5. - СПб., 2001г., стр. 11-142.
4. А. С. Алексеев, Б. Я. Гельчинский. О лучевом методе вычисления полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела. //Вопросы динамической теории распространения волн. Сборник III. – Л., 1959г., стр. 11-107.
5. А. С. Алексеев, Б. М. Бабич, Б. Я. Гельчинский. Лучевой метод вычисления интенсивности волновых фронтов. //Вопросы динамической теории распространения волн. Сборник V. – Л., 1961г., стр. 3-35.
6. Б. Я. Гельчинский. Формула для геометрического расхождения. //Вопросы динамической теории распространения волн. Сборник V. – Л., 1961г., стр. 47-53.
7. Н. Н. Матвеева, Л. Н. Антонова. Метод и программа расчета кинематики и динамики объемных волн в трехмерных неоднородно блоковых средах. //Программы для интерпритации сейсмических наблюдений. 2. - Л., 1977г., стр. 173-211.
8. А. А. Табаков, И. Е. Солтан, А. В. Решетников, В. В. Решетников. Динамическая декомпозиция волновых полей и реконструкция модели среды при обработке данных ВСП. //Тезисы научно-практической конференции «Гальперинские чтения-2002» - М., 2002г., стр. 12-13.

9. В. Н. Троян, Ю. В. Киселев. Статистические методы обработки и интерпретации геофизических данных. – Издательство С.-Петербургского Университета, 2000 г. 578с.
10. V. Cervený, I. A. Molotkov, I. Psencik. Ray method in seismology. – Praha, 1977, 214p.

## Список иллюстраций

**Рис. 1.** Модель среды.

**Рис. 2.** Система наблюдений.

**Рис. 3.**  $X$  (a) и  $Z$  (b) компоненты поля, рассчитанного по модели методом конечных разностей.

**Рис. 4.** Траектории лучей монотипной отраженной и обменной проходящей волн.

**Рис. 5.** Годографы монотипной отраженной и обменной проходящей волн.

**Рис. 6.**  $R$  (a) и  $P$  (b) компоненты поля, повернутого в поляризацию рассматриваемой волны.

**Рис. 7.** Изображение, построенное по выделенной обменной проходящей PS волне.