



# **Динамическая Декомпозиция волновых полей и Реконструкция модели среды при обработке данных ВСП.**

- **А.В. Решетников (СПбГУ), А.А. Табаков,**
- **В.В. Решетников (СПбГУ), И.Е. Солтан**

**Москва , Гальперинские чтения - 2002**

# Содержание

- 1. Введение**
- 2. Формулировка задач**
- 3. Описание модели среды**
- 4. Расчет лучей в двумерных градиентных средах с криволинейными границами раздела**
- 5. Сопоставление параметров волн, рассчитанных лучевым и конечно-разностным методами**
- 6. Технология ДДР**
- 7. Выводы**

# 1. Введение

Как правило процессы обработки и интерпретации данных сейсморазведки эти процессы 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 предлагаемом докладе представляется новая методика обработки и интерпретации данных сейсморазведки ВСП, основанная на базе двумерной градиентной модели среды, заключающаяся в том, что регулярные волны вычитаются из сейсмограммы по годографам и с амплитудами, рассчитанными по начальной модели среды, и проектируются на изображение с использованием этой модели.

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

## **2. Формулировка задач**

**Для применения лучевого метода, являющегося высокочастотным приближением, модель должна удовлетворять ограничениям на максимальную кривизну границ. Для описания произвольных сред, например соляных куполов, необходимо параметрическое задание границ.**

**Траектории лучей в средах с постоянным градиентом представляют собой дуги окружностей. Расчет таких траекторий в средах с меняющимися в пространстве градиентами должен выполняться по быстрым устойчивым алгоритмам.**

**Поскольку реальные среды обладают тонкой слоистостью, форма рассеянных волн всегда не совпадает с формой импульса возбуждения. Поэтому форма волны, отраженной от соответствующей границы опорной модели, должна определяться из реальных записей.**

**Для последующего уточнения модели, форма волны должна быть изображена в глубинном масштабе в точке рассеяния. Уточнение модели может быть выполнено путем смещения границ в положение, соответствующее осям синфазности на изображении.**

**Таким образом для реализации метода ДДР необходимо решить следующие задачи:**

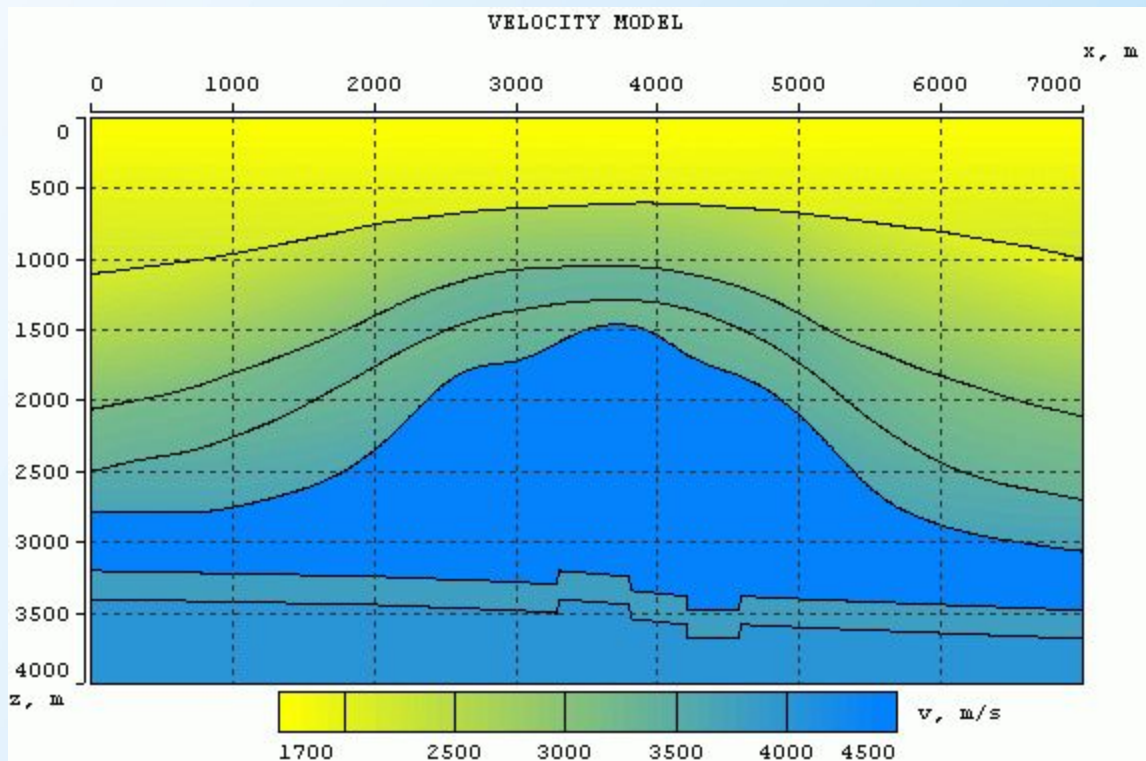
- 1. Построение модели среды удовлетворяющей условиям лучевого метода.**
- 2. Расчет кинематических и динамических характеристик волн в средах с изменяющимися градиентами скоростей.**
- 3. Оценка формы волны.**
- 4. Проектирование волны на разрез.**
- 5. Уточнение модели среды.**

### 3. Описание модели среды

Исходная модель, заданная наборами точек на границах аппроксимируется кубическими сплайнами с регуляризацией в виде соотношения смещения границы к величине скачка третьей производной.

Для каждой границы подбирается сглаживание, обеспечивающее максимальную кривизну, соответствующую ограничениям лучевого метода.

Применение параметрических сплайнов дает возможность описывать произвольные, в том числе многозначные границы.



## 4. Расчет лучей в градиентных средах с криволинейными границами раздела

Для расчета в рамках лучевого метода кинематических и динамических характеристик волн разработаны численные методы, использующие локально-точные решения, что позволило получить простые устойчивые вычислительные процедуры. Основными из них являются программы слежения луча с учетом преломления-отражения в точке пересечения луча с границей и расчета динамических характеристик волн.

### Слежение лучей.

Для слежения лучей модель была разбита на квадратную сетку с шагом,  $\Delta S$  внутри элементов которой градиент скоростей считался неизменным. В каждом квадрате сетки заданы модуль вектора градиента скоростей и его направление. В случае линейной зависимости скоростей упругих волн от координат (градиент скоростей постоянен):

$$v(x, z) = a_0 + a_1 x + a_2 z.$$

Введем локальную систему координат  $(x', z')$  в которой скорость оказывается функцией только  $z'$ .

$$v(x, z) = v(z') = b_0 + b_1 z'$$

В новой системе координат траектория луча представляет собой окружность:  $x' = \gamma_1 - \frac{\beta}{\alpha^2} \sqrt{1 - \alpha^2 v^2(z')}$

где  $\alpha, \beta, \gamma_1$  некоторые константы. Это уравнение окружности с координатами центра  $\gamma_1, \frac{b_0}{b_1}$

ее радиус  $R$  имеет вид:

$$R = \frac{1}{\alpha |b_1|} = \frac{v(z'_H)}{b_1 \sin \theta_H(z'_H)}$$

Здесь

$$\alpha = \frac{\sin \theta_H}{v(z'_H)} = \frac{\sin \theta(z')}{v(z')} \quad \gamma_1 = \frac{v(z'_H)}{b_1} \operatorname{ctg} \theta_H \quad \beta = \frac{\sin \theta_H}{v(z'_H)}$$

$\alpha$  - параметр луча

$\theta_H$  - угол выхода луча из начальной точки  $(x'_H, z'_H)$

Так как скорости меняются нелинейно, то слежение луча проводится пошагово. Направление и величина шага выбираются исходя из учета параметров среды в начальной точке (величина и направление градиента берутся из элемента сетки, в котором находится начальная точка). Шаг определяет хорду  $H_i$  окружности, являющейся истинной траекторией. Первый шаг делается по хорде  $H_0$ , составляющей угол  $\Phi$  с направлением луча ( $\Phi$  является параметром задачи и определяет точность ее решения.). Величины хорд рассчитываются по формуле:

$$H_i = 2R_i \operatorname{tg}\Phi$$

где  $R_i = \left| \frac{V(x_i, z_i)}{k(x_i, z_i) \sin(\theta_i - \alpha_i)} \right|$  ( $i=0, 1, \dots, N$ ),

$(x_i, z_i)$  начальная точка  $i$ -ой хорды

$V(x_i, z_i)$  скорость продольной волны

$k(x_i, z_i)$  модуль градиента скоростей

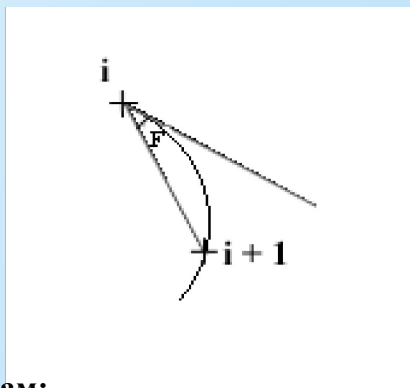
$\theta(x_i, z_i) = \theta_i$  направление касательной к траектории луча

$\alpha(x_i, z_i) = \alpha_i$  направление градиента скоростей

Направляющий угол первой хорды равен  $\theta_0 + \Phi$ , где  $\theta_0$  - начальный угол, под которым был запущен луч.

Каждая из последующих хорд поворачивается на угол  $2\Phi$  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, как и хорда.



Координаты концов хорд вычисляются по следующим формулам:

$$x_1 = x_0 + H_0 \sin\Psi_0$$

$$x_2 = x_1 + H_1 \sin\Psi_1$$

$$x_{i+1} = x_i + H_i \sin\Psi_i$$

$$z_1 = z_0 + H_0 \cos\Psi_0$$

$$z_2 = z_1 + H_1 \cos\Psi_1$$

$$z_{i+1} = z_i + H_i \cos\Psi_i$$

$$\Psi_0 = \theta_0 \pm \Phi_0$$

$$\Psi_1 = \theta_1 \pm \Phi_1$$

$$\Psi_{i+1} = \theta_i \pm \Phi_i$$

В том случае, когда величина  $H_i$  превышает  $\Delta S/2$  выполняется пересчет  $\Phi$  по формуле  $\Phi = \arcsin(\Delta S/2)$ . Т.е. при любых параметрах среды шаг по лучу не может быть больше чем половина длины элемента сетки.

Учет преломления-отражения в точке пересечения хорды луча с границей производится следующим образом:

В точке пересечения проводится касательная к границе, вычисляется касательная к границе компонента вектора рефракции падающего луча заданного типа и по этой, сохраняющейся при отражении-преломлении компоненте, рассчитывается нормальная к границе компонента вектора рефракции преломленного или отраженного (монотипного или обменного) луча . Заданы вектор

$$\vec{p}_v^{(in)} = \frac{\vec{n}}{v_v}$$

рефракции падающей волны  $v$ -ого типа  $\vec{p}_v^{(in)} = p_{v\parallel}^{(in)} \vec{m} + p_{v\text{ort}}^{(in)} \vec{N}$ , и в точке встречи - вектор касательной к границе  $\vec{m}$  и вектор нормали к границе блока  $\vec{N}$  (внешняя нормаль).

Вектор рефракции преломленной или отраженной волны  $\vec{p}_\mu^{(out)} = p_{\mu\parallel}^{(out)} \vec{m} + p_{\mu\text{ort}}^{(out)} \vec{N}$ , где

$$p_{v\parallel}^{(in)} = p_{\mu\parallel}^{(out)} \quad p_{\mu\text{ort}}^{(out)} = \pm \frac{\sqrt{1 - (p_{\mu\parallel}^{(out)} v_\mu)^2}}{v_\mu}$$

## Расчет динамических характеристик волн.

Для расчета амплитуд в каждом приемнике по известной траектории соответствующего луча использовалась формула :

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

Где :

$\chi_i$  коэффициент преломления отражения луча на  $i$ -той границе

$n$  – число границ, пересекаемых волной

$\theta_i$  углы падения и отражения (преломления) на границе

$v_i$  скорости на луче до и после пересечения  $i$ -той границы

$\rho_i$  соответствующие плотности.

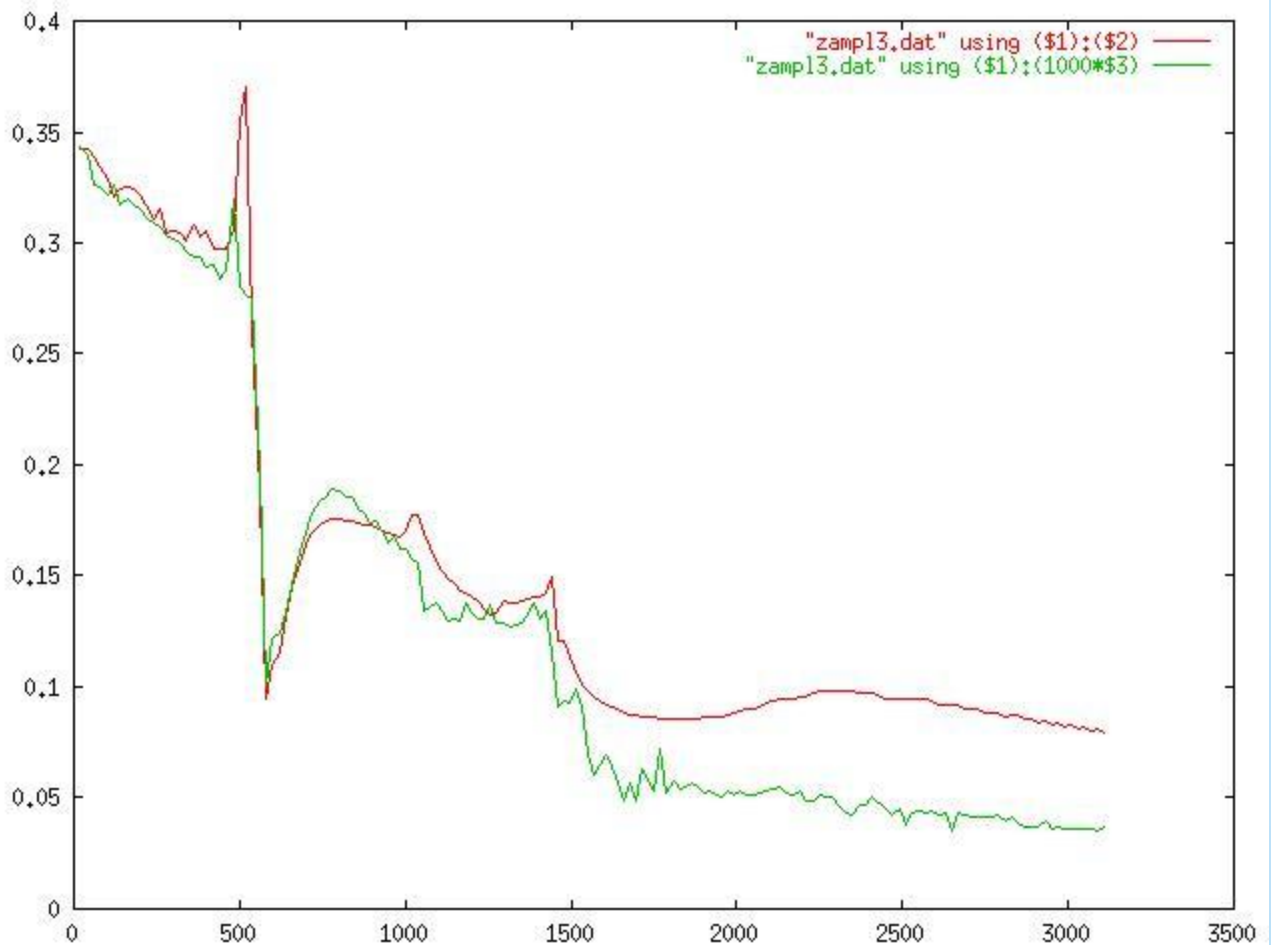
$L(M)$  – геометрическое расхождение лучевой трубки

Для расчета геометрического расхождения пускались дополнительные лучи с начальными углами  $a+da$  и  $a-da$ , где  $a$  – начальный угол луча, а  $da$  – небольшое приращение. Геометрическое расхождение определялось как отношение диаметров лучевой трубки (расстояния между боковыми лучами) вблизи источника и на скважине .



## 5. Сопоставление параметров волн, рассчитанных лучевым и конечно-разностным методами.

Кинематические параметры волн рассчитанные лучевым методом и выделенные из поля, рассчитанного конечно-разностным методом, хорошо согласуются друг с другом. В то время как динамические характеристики хорошо совпадают только в отдельных интервалах глубин. Расхождение амплитуд будет являться предметом дальнейших исследований.



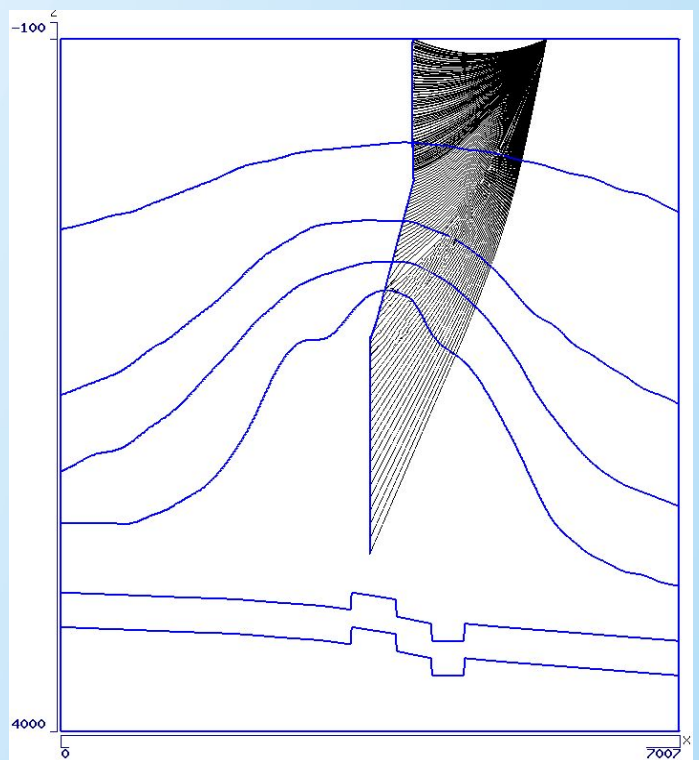
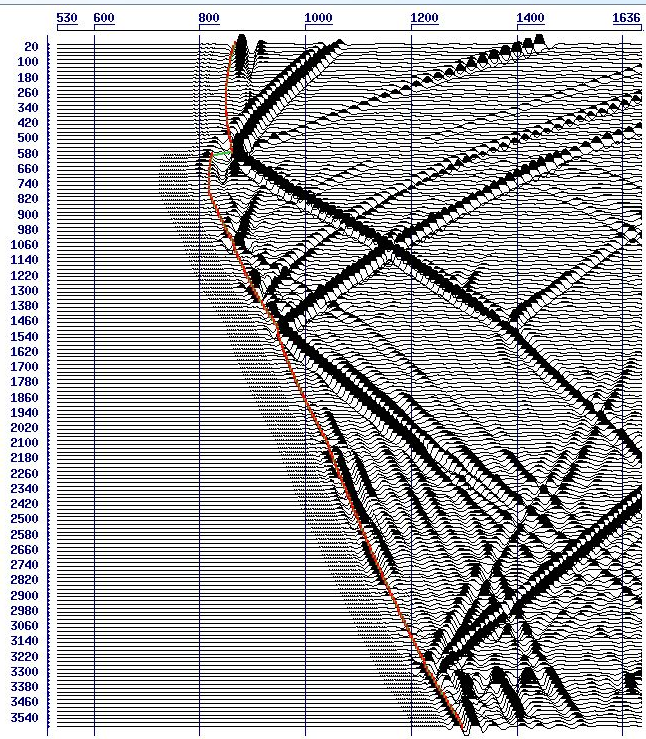
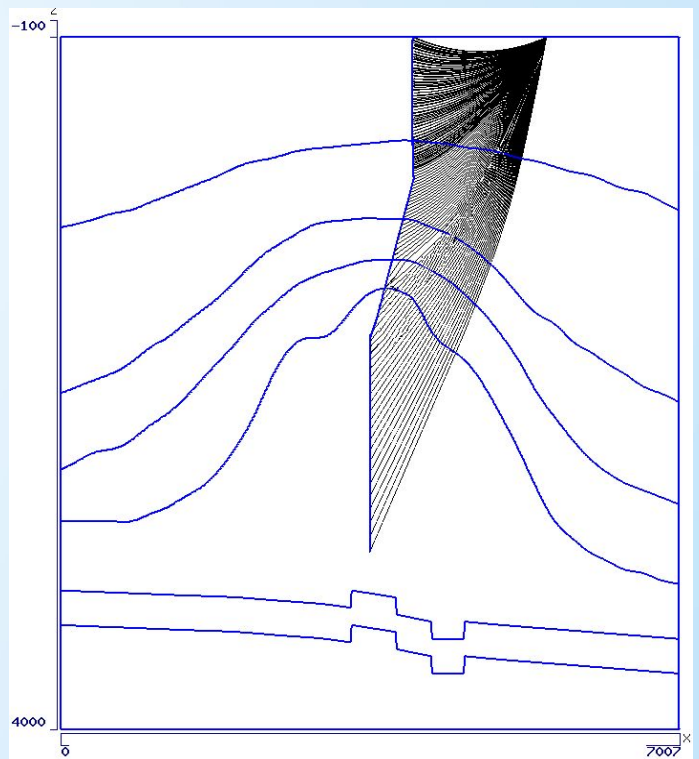
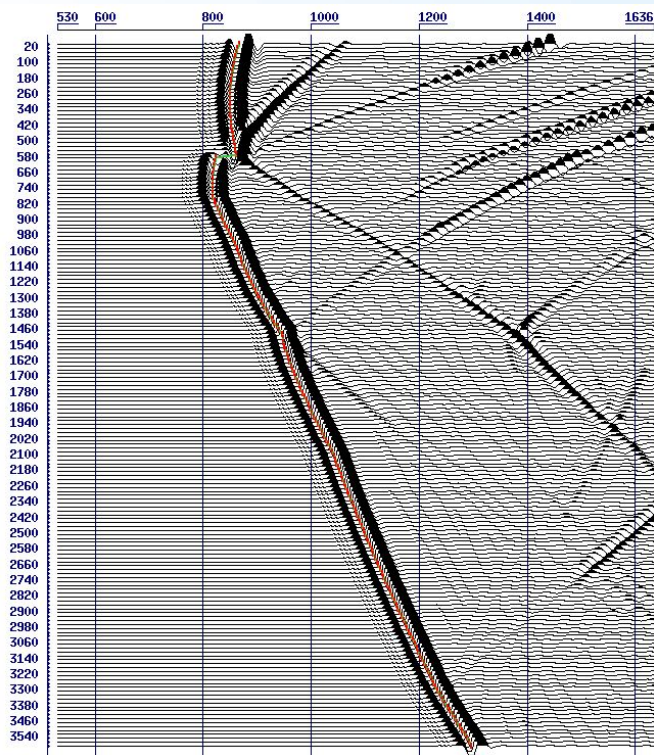
## **6. Технология ДДР**

**Технология обработки данных ВСП по методике ДДР состоит из нескольких процедур:**

- 1. Построение первого приближения модели среды в результате решения обратной кинематической задачи по годографам и поляризациям всех визуально корректируемых 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 проецируется 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.**

**На рисунках показан процесс расчета лучей и годографов и процесс выделения и вычитания волн.**



## **7. 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 усовершенствуя, как процессы обработки (векторная селекция волн), так и вопросы интерпретации - построение изображения среды.