



# ВВЕДЕНИЕ В ГЕОМЕХАНИКУ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Семестровый курс  
Лекция 5

---



- Поисковая сейсмология.  
Сейсмические источники и приемники.
- Получение, обработка и интерпретация сейсмических данных.
- Оцифровка записей. Преобразование Фурье. Деконволюция. Миграция.



# Поисковая сейсмология.

- Сейсморазведка – наиболее широко применяемый (хотя и самый дорогой и трудоемкий) метод геофизической разведки. Главное назначение сейсморазведки - поиск и разведка нефти и газа.
- Методика сейсморазведки основана на изучении кинематики (времени пробега от источника до сейсмоприемников), и динамики (амплитуды) сейсмических волн.
  - метод отраженных волн (МОВ)
  - метод преломленных волн (МПВ)
  - вертикальное сейсмическое профилирование



# Параметры волн

$\lambda$  длина волны

$T$  период волны

$f = 1/T$  частота колебаний

$\omega = 2\pi f$  угловая частота

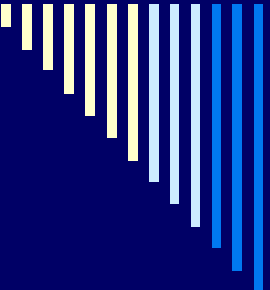
$A_0$  амплитуда волны,  $A = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$

$v = \lambda f$  фазовая скорость

$v_g$  групповая скорость

$\rho v^2$  акустическая жесткость

- принцип суперпозиции волн
- дисперсия волн – зависимость скорости распространения от частоты
- принцип Гюйгенса  
каждую точку фронта волны можно рассматривать как самостоятельный элементарный источник колебаний
- принцип Ферма  
волна распространяется между двумя точками по такому пути, который требует наименьшего времени для ее распространения



# Скорости продольных волн в некоторых средах

Наименование породы или среды	$V_p$ (км/с)	
	от	до
Воздух	0,3	0,36
Почвенный слой	0,2	0,8
Гравий, щебень, песок	0,1	1,0
Вода	1,43	1,59
Глина	1,2	2,5
Песчаник	1,5 (рыхлые)	4,0 (очень плотные)
Сланцы	2,0	5,0 (метаморфические)
Известняки, доломиты	3,0	6,0
Лед	3,0	4,0
Гранит	4,5	6,5
Базальт	5,0	7,0



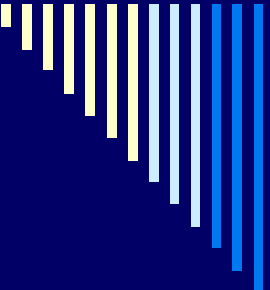
# Аппаратура и методика сейсморазведки

- источники возбуждения упругих волн (взрывные и невзрывные);
- устройства, воспринимающие упругие колебания и преобразующие их в электрические сигналы (сейсмоприемники или геофоны при наземных работах, пьезоприемники и гидрофоны при работах на акваториях);
- сеймостанции, включающие многоканальные усилители и регистраторы (аналоговые или цифровые);
- компьютеры для обработки информации;
- вспомогательное оборудование (буровые станки, автомобили для транспортировки приемных установок, провода и прочее).

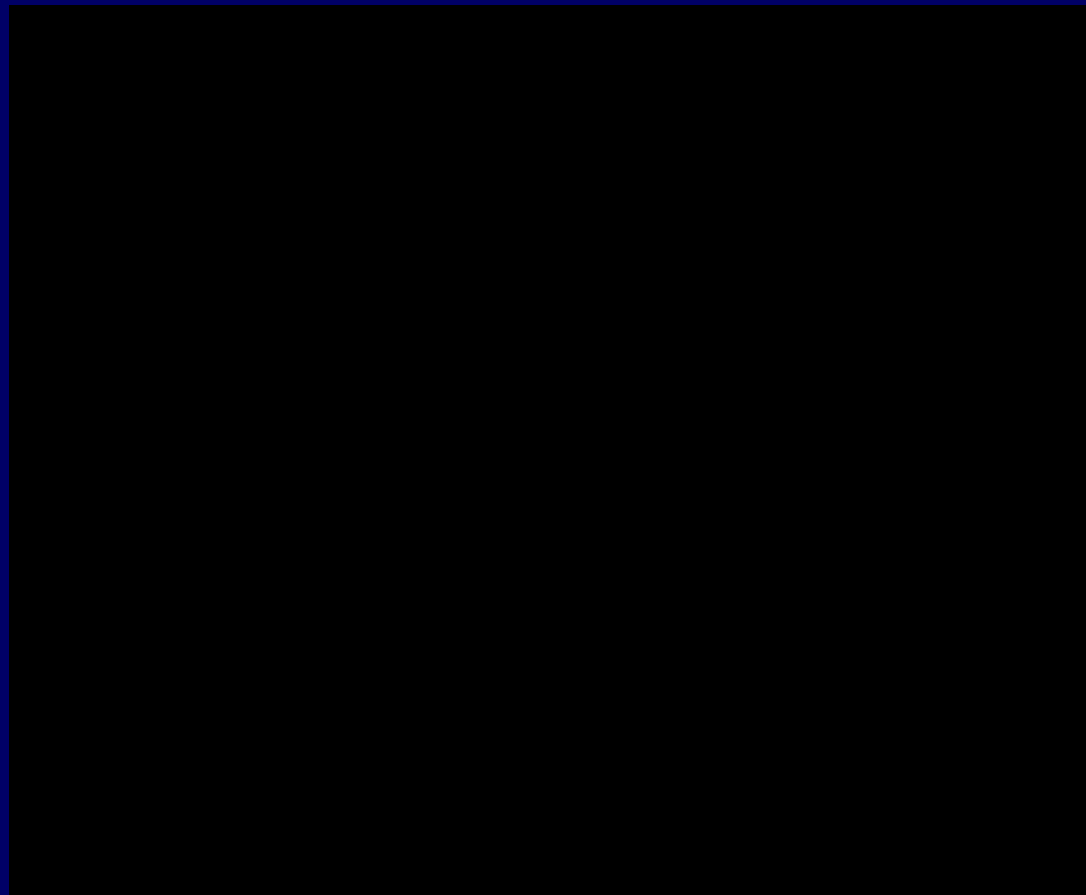
# Установка сейсмоприемников - геофонов



---



Вибраторы – источники монохромных волн или колебаний с переменной частотой (свилов)



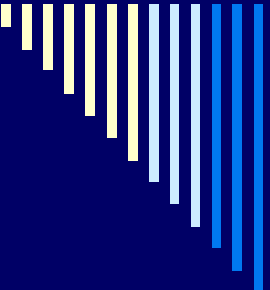


# Взрывной источник сейсмических волн



# Регистрация сейсмических волн





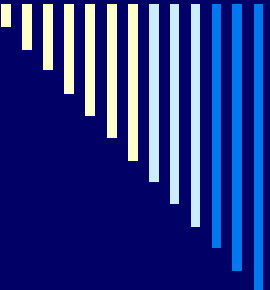
# Типы скоростей в слоистых средах

- *Истинная скорость* - скорость волны в малом объеме породы, определяется ультразвуковыми измерениями на образцах.
- *Пластовая скорость* - средняя скорость распространения упругих волн в пласте.
- *Интервальная скорость* - средняя скорость в данном интервале глубин.
- *Средняя скорость* в пачке пластов

$$\hat{V} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}$$

где  $h$  – мощности отдельных пластов данной слоистой среды;  $t$  – времена пробега в каждом пласте, измеренные вдоль луча, перпендикулярного слоистости.

- *Эффективная скорость* - средняя скорость, определяемая в предположении о постоянстве скорости в толще над отражающей границей.
- *Граничная скорость* - скорость распространения скользкой преломленной волны вдоль преломляющей границы.
- *Кажущаяся скорость* - это скорость распространения фронта любой волны вдоль профиля наблюдений. Она равна отношению приращения пути ко времени его прохождения волной.



# Принципы решения прямых задач сейсморазведки

- Прямой задачей сейсморазведки называется расчет времен прихода и амплитуд волн от известного источника для известного сейсмогеологического разреза.
- Динамическая задача 
$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = V^2 \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right)$$
- Кинематическая задача: определение времени прихода волны для известного разреза исходя из положения источника и момента возбуждения волны. Простейший результат – получение уравнения годографа (графика зависимости времени прихода волны от расстояния)

# Прямая и обратная задача отраженной волны для двухслойной среды с наклонной границей раздела

Под однородной покрывающей средой со скоростью распространения упругих волн  $V_1$  расположена вторая среда со скоростью  $V_2$ . Требуется *найти уравнение годографа*.

$$t = \frac{OA + Ax}{V_1}$$

$$\Delta OAB = \Delta O^*AB \text{ (прямой вид)} = \angle xAC_1 \Rightarrow O^*x -$$

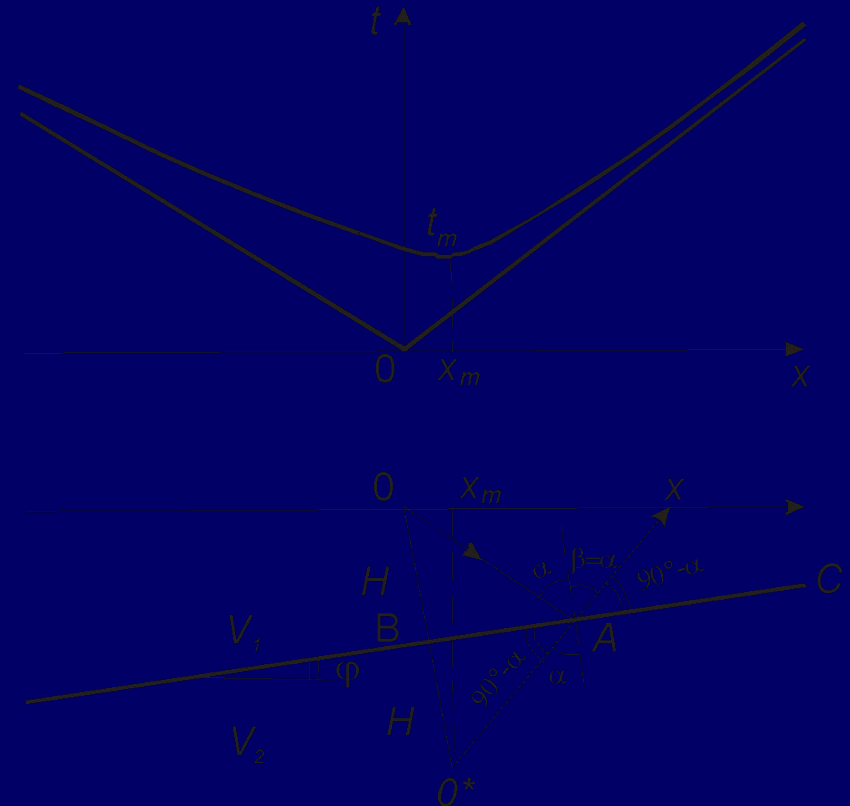
$$OA + Ax = \sqrt{(x_m O^*)^2 + (x - x_m)^2}$$

$$Ox_m = x_m = 2H \sin \varphi, \quad O^*x_m = 2H \cos \varphi$$

$$t = \frac{1}{V_1} \sqrt{x^2 + 4H^2 - 4Hx \sin \varphi}$$

$$x_0 = 0, t_0 = \frac{2H}{V_1}; \quad t_{\min} = \frac{2H \cos \varphi}{V_1}, \quad x = 2H \sin \varphi$$

$$t = \frac{1}{V_1} \sqrt{x^2 + 4H^2 \pm 4Hx \sin \varphi}$$



# Обратная задача.

- Способ постоянной разности при обработке одиночных годографов. Для двух точек, находящихся на расстоянии  $m$  друг от друга:

$$V_1^2 t_1^2 = x^2 + 4H^2 - 2Hx \sin \varphi, \quad V_1^2 t_2^2 = (x+m)^2 + 4H^2 - 2H(x+m) \sin \varphi$$

$$U = t_2^2 - t_1^2, \quad V_1^2 U = 2xm + m^2 - 4Hm \sin \varphi, \quad V_1 = \sqrt{2m \frac{dx}{dU}}$$

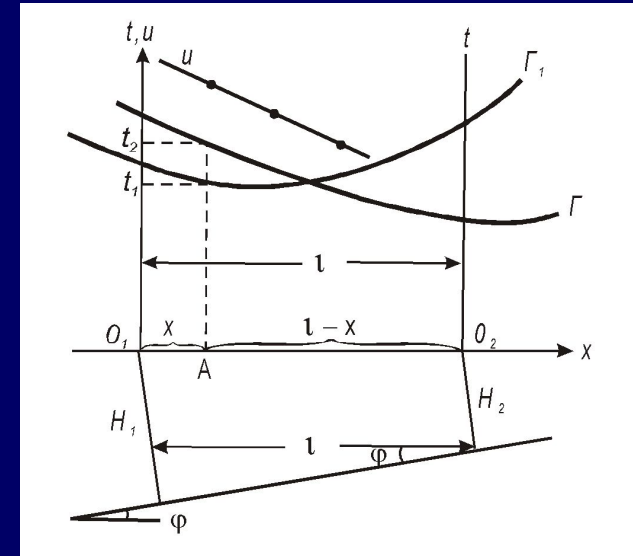
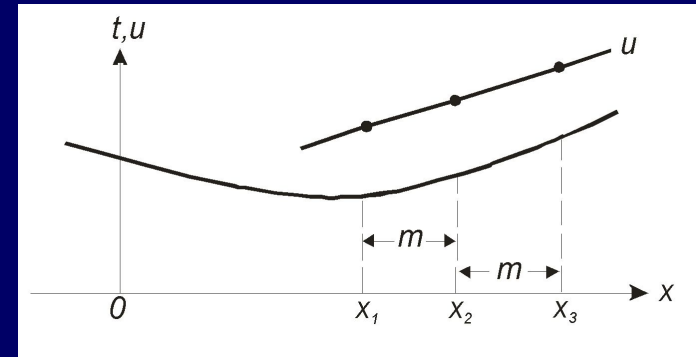
- Способ двух встречных годографов

$$V_1^2 t_1^2 = x^2 + 4H_1^2 - 4xH_1 \sin \varphi, \quad V_1^2 t_2^2 = (l-x)^2 + 4H_2^2 + 4(l-x)H_2 \sin \varphi$$

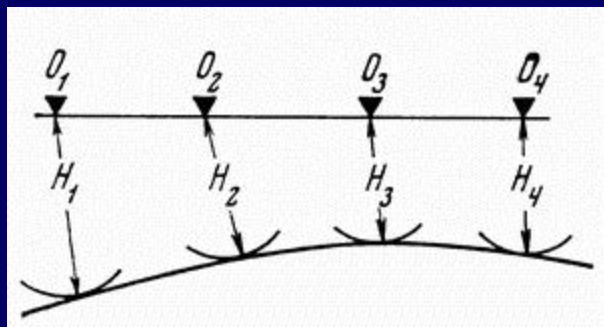
$$H_2 = H_1 - l \sin \varphi, \quad U = t_2^2 - t_1^2$$

$$V_1^2 U = l^2 - 2lx - 4l \sin \varphi (2H_1 - l \sin \varphi) + 4(l-x)^2 (H_1 - l \sin \varphi) \sin \varphi - 4xH_1 \sin \varphi$$

$$V_1^2 U = -2lx \cos 2\varphi + B, \quad V_1 = \sqrt{2l \frac{dx}{dU}}$$



# Способы построения отражающих границ

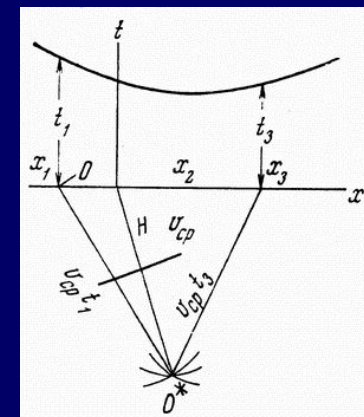


Способ  $t_0$

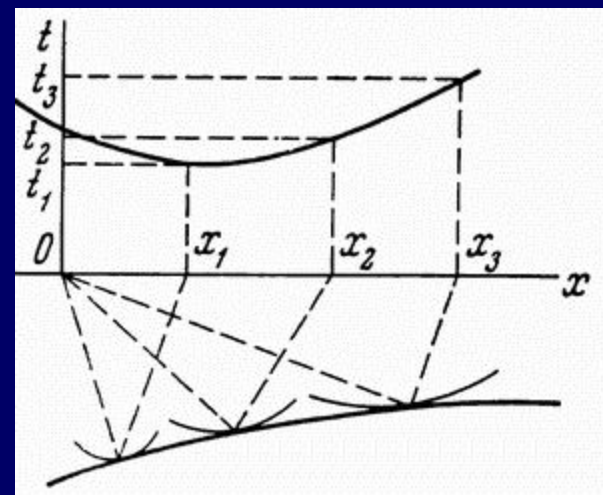
$$H_i = \frac{t_{0i} V_1}{2}$$

Способ засечек На профиле наблюдений выбирают 3 - 5 точек и из них проводят засечки радиусами

$$R_i = V_1 t_i$$



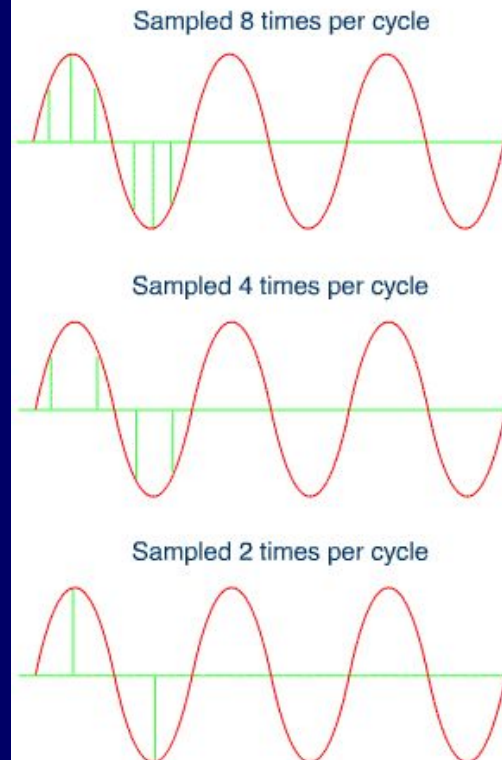
**Способ эллипсов.** Берется нить длиной  $V_1 t_1$ . Ее концы закрепляются кнопкой в точках  $O$  и  $x_1$ . Натягивая нить карандашом чертят эллипсы. Отражающей границей является огибающая всех эллипсов.



# Цифровая обработка сейсмических данных

- Преобразования Фурье
- Свертка сигналов (конволюция)
- Корреляция
- Миграция

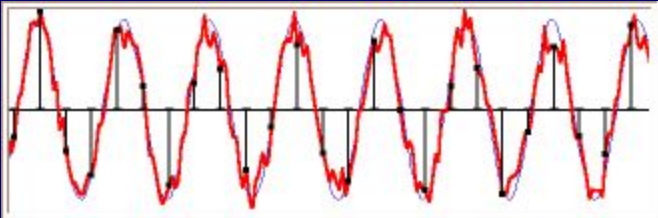
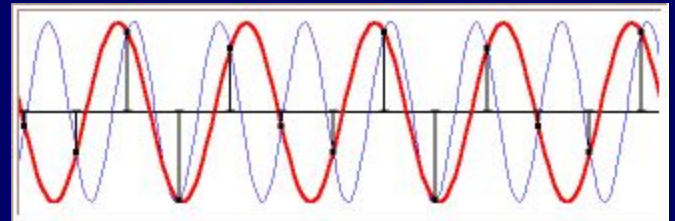
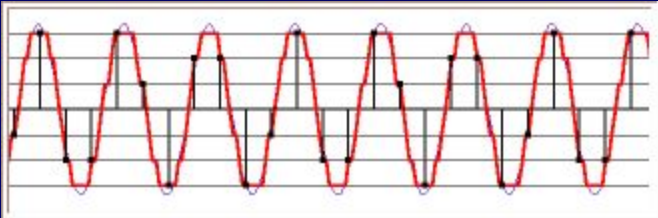
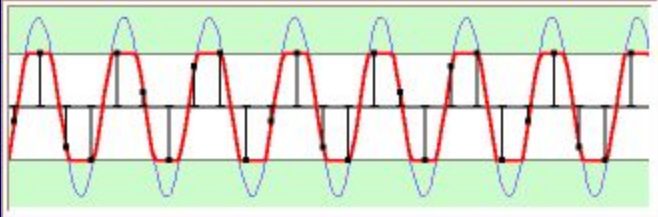
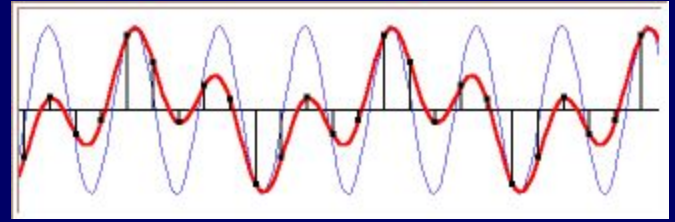
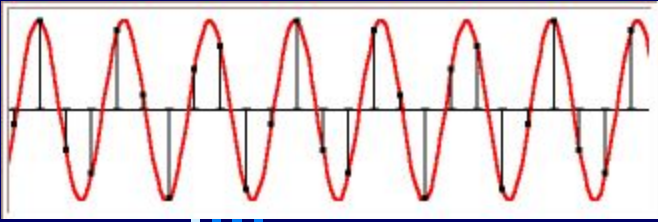
Consider, now, the frequency aspects of sampling.



When we sample closely along a waveform, we should be able to construct a new wave from the samples, and the resultant wave will be the same as the original.

In other words, our sampling scheme should preserve sufficient of the information from the input waveform as is necessary to reconstruct an identical wave, but should sample no more than is necessary to achieve this.







# Преобразования Фурье

преобразуют функции во временной области в функции в частотной области и обратно. Часто используют быстрое преобразование Фурье  
Комплексное представление гармонических колебаний имеет вид

$$A(\sin p + i \cos p)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, а  $p$  – его фаза. Взяв действительную  $Re$  и мнимую  $Im$  части от результата преобразования Фурье, легко найти распределение амплитуд и фаз колебаний по частотам – амплитудный и фазовый спектры:

$$A = \sqrt{Re^2 + Im^2}, \quad p = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right).$$

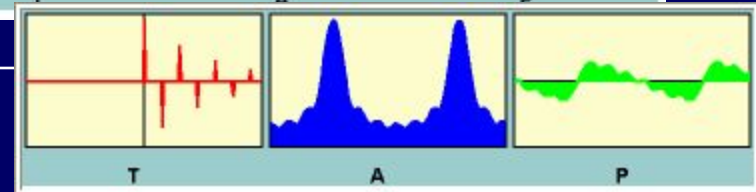
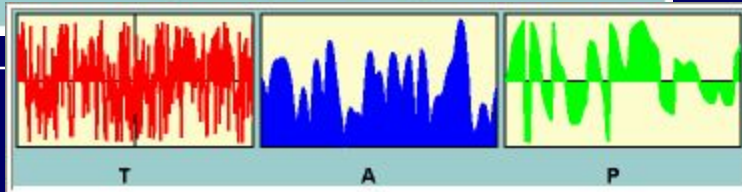
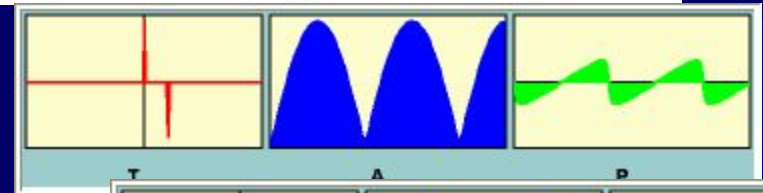
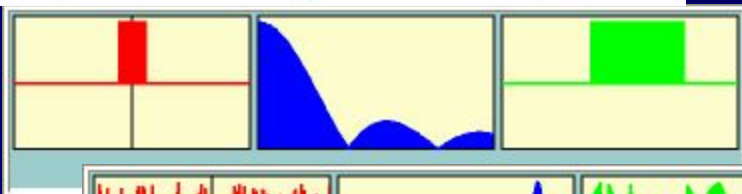
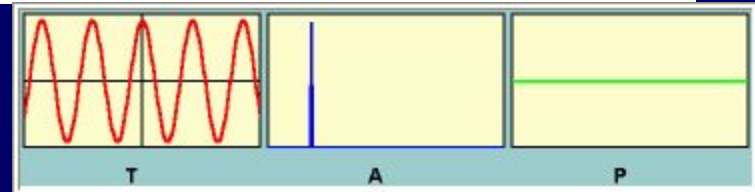
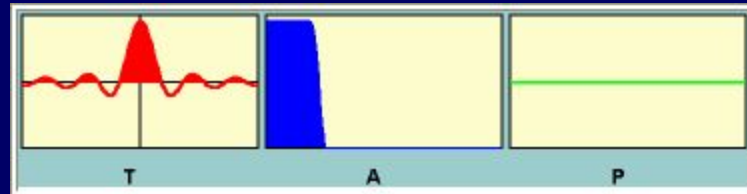
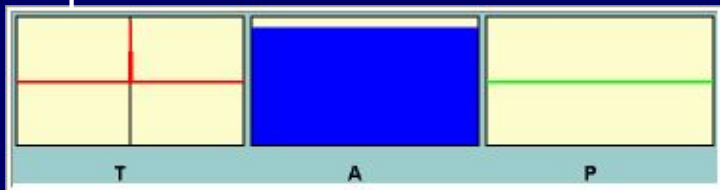
$$f(p) = \int_{-\infty}^{\infty} F(q)e^{2\pi ipq} dq$$
$$F(q) = \int_{-\infty}^{\infty} f(p)e^{-2\pi ipq} dp$$
$$F_s = \sum_{t=0}^{n-1} f_t e^{\frac{2\pi ist}{n}}$$

## Спектр прямоугольного импульса

$$F_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_t(t)e^{-2\pi ift} dt = \int_{-\tau/2}^{+\tau/2} A_0 e^{-2\pi ift} dt =$$
$$= \frac{A_0}{-2\pi if} (e^{-\pi if\tau} - e^{\pi if\tau});$$
$$F_s(t) = \frac{A_0}{\pi f} \sin \pi f\tau = A_0\tau \frac{\sin \pi f\tau}{\pi f\tau} = A_0\tau \operatorname{sinc}(\pi f\tau);$$
$$A = A_0\tau |\operatorname{sinc}(\pi f\tau)|.$$

# Амплитудные и фазовые спектры

Т - временная функция, А и Р - амплитудные и фазовые спектры: 1 –  $\delta$ -функция (суперпозиция синусоидальных колебаний всех частот с нулевой фазой – белый шум); 2 – аналогично 1 с ненулевой фазой; 3 – прямоугольный сигнал; 4 – случайный сигнал (набор случайных чисел); 5 – sinc-функция; 6 – гармонический сигнал; 7 – импульс и его отражение; 8 – импульс и его последовательные отражения



# Конволюция и деконволюция

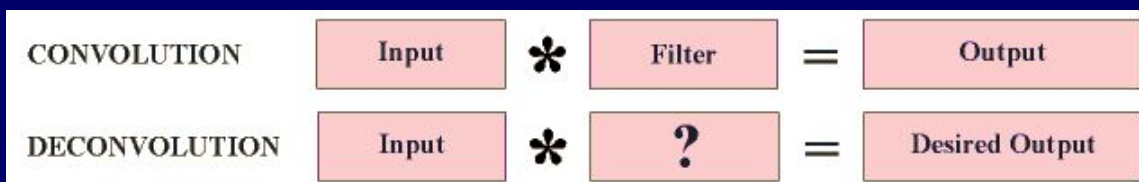
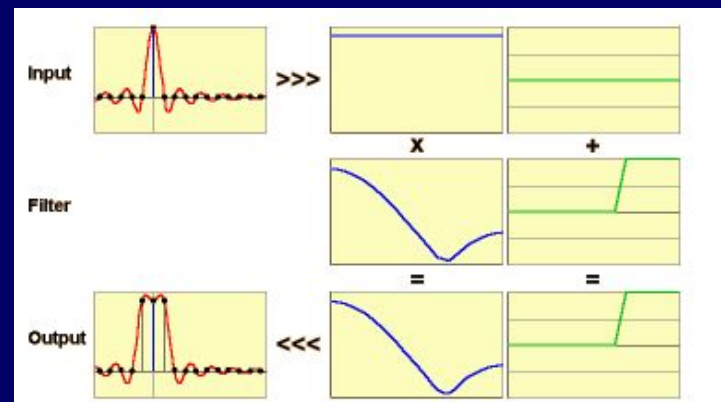
## □ Конволюция (свертка):

Исходный сигнал+среда  
(фильтр)=регистрируемый  
сигнал

$$F(t) = f(t) * g(t),$$

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau.$$

$$f(t) * g(t) = \sum_{\tau=0}^{\tau=\infty} f(t)g(t-\tau).$$

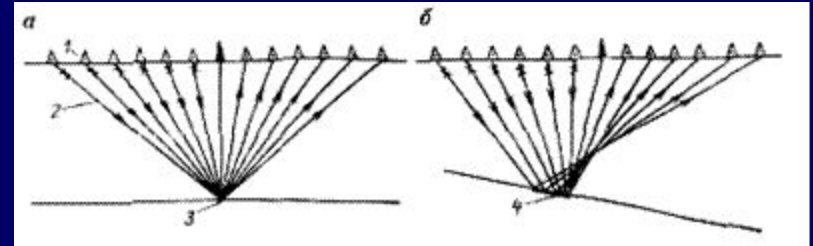


В частотном представлении сигнала свертка сводится к умножению амплитудных и сложению частотных Фурье-спектров сигнала и фильтра.

Операция устранения фильтрующего влияния среды и восстановления отражений исходного сигнала по зарегистрированной записи называется *деконволюцией* (обратной сверткой):

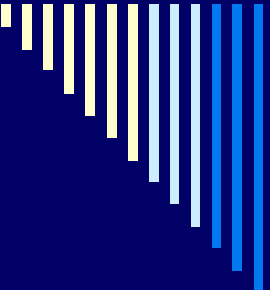
$$f(t) = g^{-1}(t) * F(t).$$

# Метод общей глубинной точки



- В *методе общей глубинной точки* (МОГТ) источник и приемник разносят вдоль профиля симметрично относительно некоторой фиксированной на профиле точки  $x_k$ .
- Пусть приемник и источник находятся на удалении  $l$  от средней точки. При плоской наклонной границе эхо-глубина под источником  $h_l$  связана с эхоглубиной  $h_0$  в точке  $x_k$ :  
 $h_l = h_0 \pm l \cdot \sin \varphi$ . Подставляя в выражения для годографов вместо  $x$  величину  $2l$  и вместо  $h$  величину  $h(\pm l) = h_0 \pm l \cdot \sin \varphi$ , получаем уравнение годографа ОГТ. При горизонтальной плоской границе точка отражения для всех позиций является общей. При наклонной границе точка отражения смещается по восстанию отражающей границы на величину

$$\varepsilon(l) = \frac{L^2}{4H} \sin \varphi \cos \varphi = \frac{L^2}{8H} \sin 2\varphi.$$



# Метод общей глубинной точки

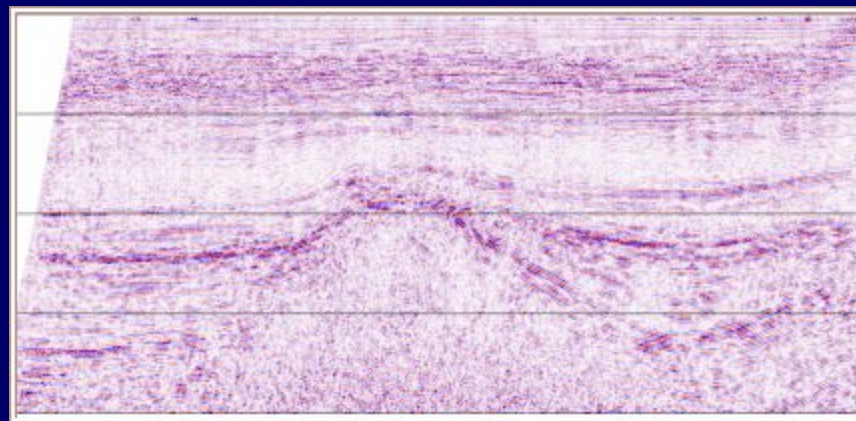
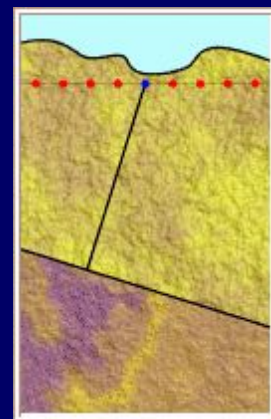
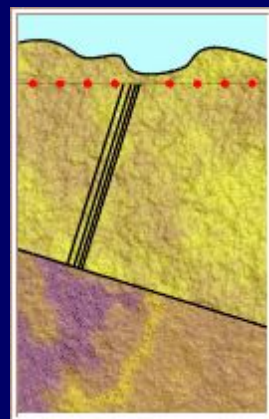
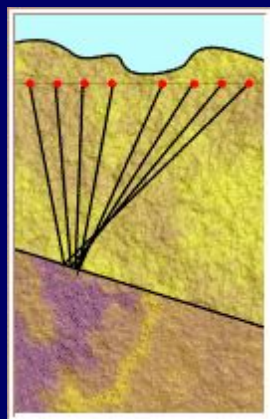
- Выражения для годографов однократных и  $m$ -кратных волн для МОГТ имеют вид

$$t(l) = \frac{2}{v_{eff}} \sqrt{l^2 \cos^2 \varphi + H_{eff}^2} = \sqrt{t_0^2 + \frac{4l^2 \cos^2 \varphi}{v_{eff}^2}},$$

$$t^{(m)}(l) = \sqrt{\left(t_0^m\right)^2 + \frac{4l^2 \cos^2 m\varphi}{v_{eff}^2}},$$

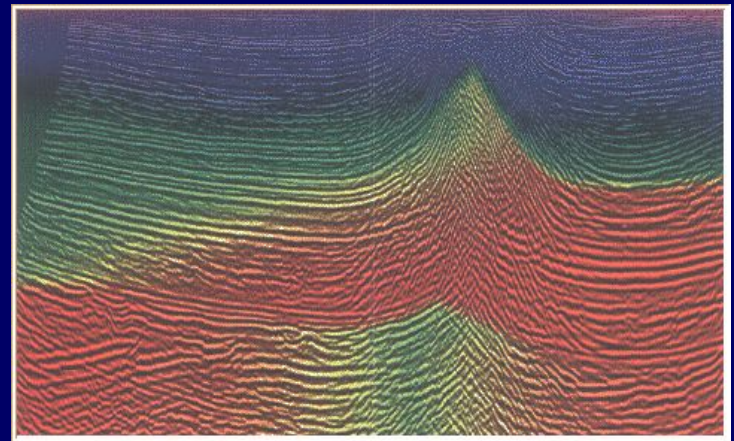
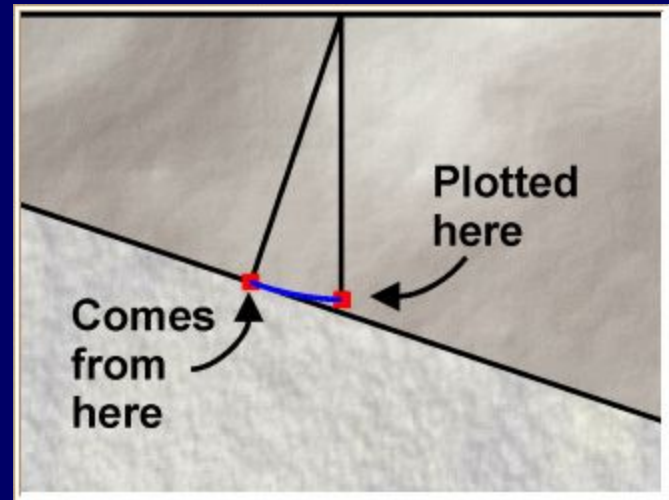
- $v_{eff}$  — эффективная скорость для слоистой толщи или истинная скорость для однородного слоя;  $\varphi$  — угол наклона соответствующей границы;  $m$  — кратность отраженной волны

# Метод общей глубинной точки



# Миграция

Миграционное преобразование сводится к перемещению отражающих площадок в их истинное положение на разрезе. Отклонение расчетных отражающих площадок от истинных связано с локальными отклонениями скоростей от эффективных значений и наклоном отражающих горизонтов. Строятся эхо-глубины, касательные к которым аппроксимируются искомыми границами. Простейшим миграционным приемом ручной интерпретации МОВ является построение отражающей границы способом эллипсов. Современные компьютерные алгоритмы миграции содержат решение волнового уравнения.







---

# Дополнительная литература

- Козлов Е.А. Миграционные преобразования в сейсморазведке.- М.: Недра, 1986. - 247 с.
  - Сейсморазведка: Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.П.Номоконова. 2-е изд.- М.: Недра, 1990.
  - Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика: Пер. с англ.- М.: Мир, 1989
-