

# Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

## Лекция 9

### Сейсморазведка (часть 3)

# **Метод преломленных волн**

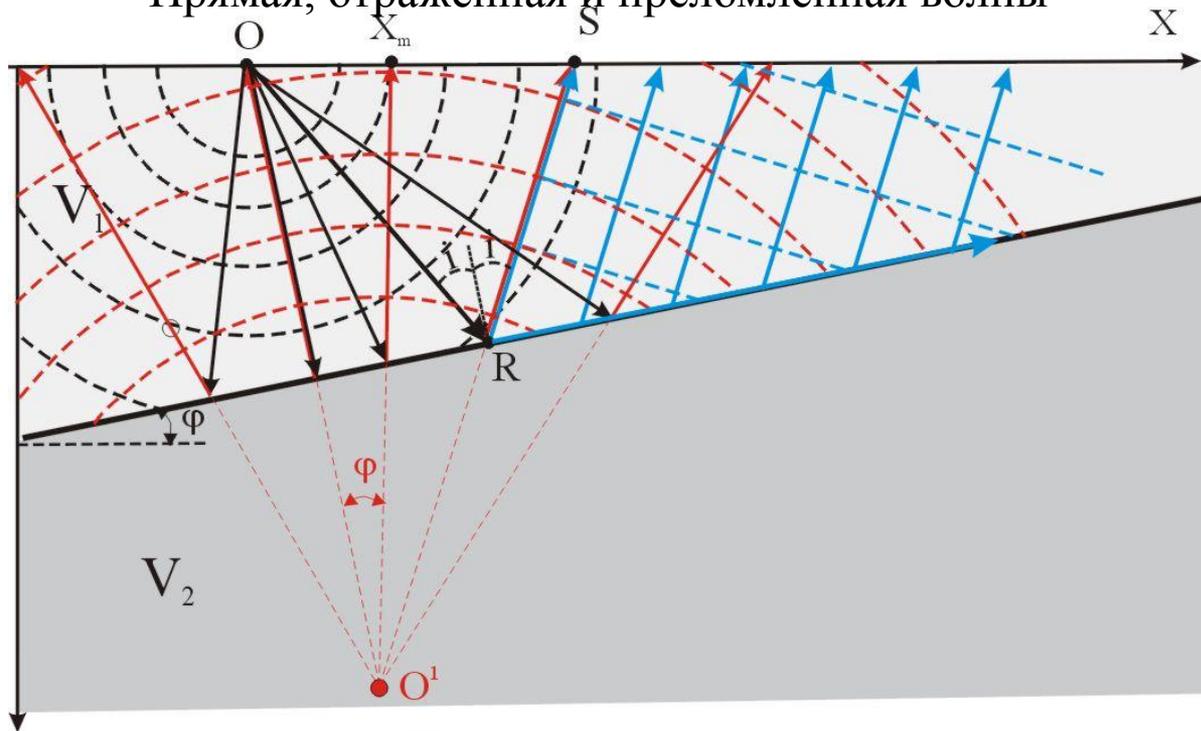
# Формирование отраженных и преломленных волн на границе

двух сред,

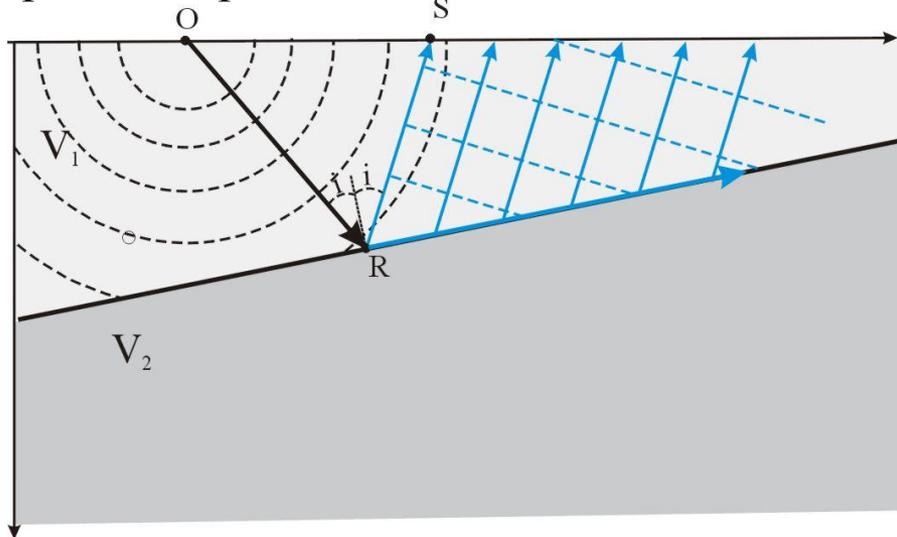
Двухслойная среда со скоростями  $V_1 < V_2$ ,

$\varphi$  — угол наклона границы

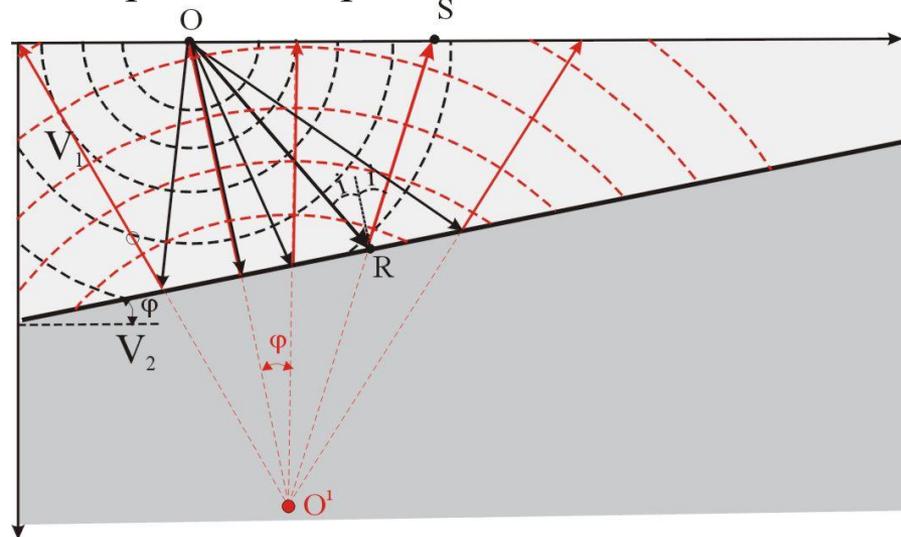
Прямая, отраженная и преломленная волны



Прямая и преломленная волны



Прямая и отраженная волны

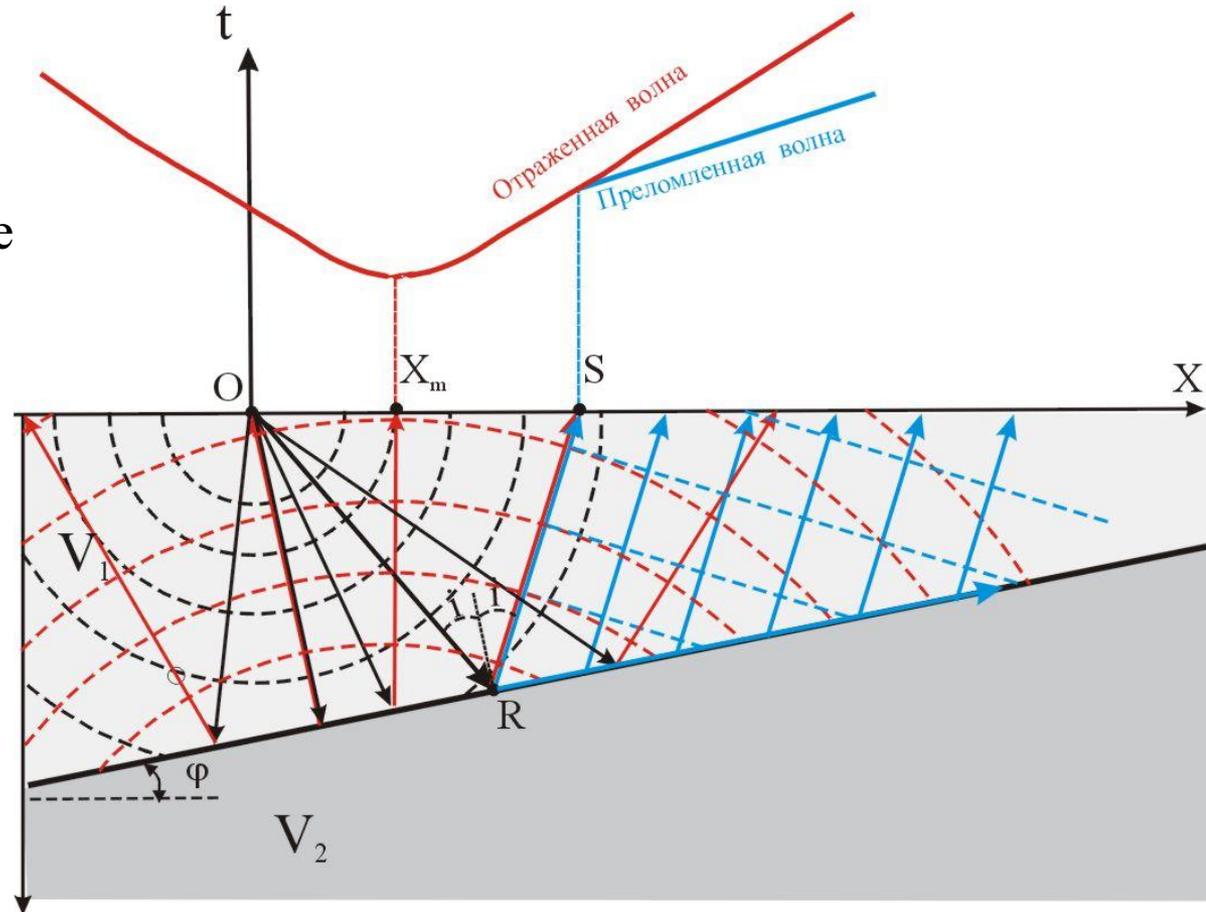


# Годографы отраженных и преломленных волн

- Двухслойная среда со скоростями  $V_1 < V_2$
- Критический угол  $i$  достигается в точке R, где

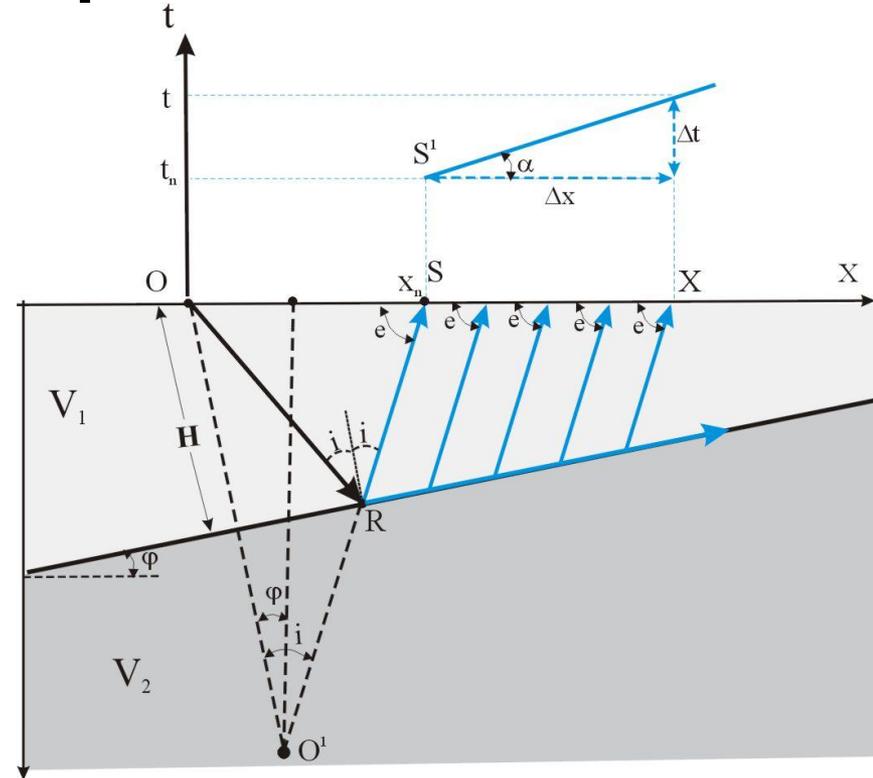
$$\sin i = V_1 / V_2$$

- Луч скользит со скоростью  $V_2$  вдоль границы сред, формируя **головную преломленную волну**.
- Лучи головной преломленной волны – параллельны и т.о. фронт волны – плоский.



- **Отраженная волна** (как и прямая волна) – сферическая. Ее скорость -  $V_1$ . В точку R отраженная и преломленная волна приходят вместе. Далее, в связи с тем что преломленная волна движется со скоростью  $V_2 > V_1$  преломленная волна опережает отраженную.

# Уравнение годографа ГОЛОВНОЙ преломленной волны



Преломленная волна приходит раньше ОВ и, на некотором удалении от ПВ раньше прямой волны. Поэтому МПВ велись методом первых вступлений.

- Двухслойная среда: скорости  $V_1 < V_2$
- $S(x_n, t_n)$ -первая точка выхода преломленной волны,  $\varepsilon$ -угол выхода волны. Так как все лучи параллельны  $\varepsilon = \text{const}$ ;  $V_k = \Delta x / \Delta t = \text{const}$   
 $V_k$ - кажущаяся скорость.
- Годограф преломленной волны – прямолинейный. Начинается в точке  $S(x_n, t_n)$ ;  $\text{tg} \alpha = \Delta t / \Delta x = 1 / V_k$
- Найдем уравнение годографа.

По восстанию пласта:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t - t_n}{x - x_n} = \frac{1}{V_{kB}}, \text{ где индекс } B \text{ – по восстанию}$$

- Найдем  $t_{nB}$  и  $x_{nB}$ . После преобразований:

$$t = \frac{1}{V_1} \{x \cdot \sin(i \pm \varphi) + 2H \cdot \cos i\} \quad \begin{array}{l} (+) \text{ – по восстанию пласта} \\ (-) \text{ – по падению пласта} \end{array}$$

Для горизонтальной границы ( $\varphi = 0$ )

$$t = \frac{1}{V_1} (x \cdot \sin i + 2H \cdot \cos i)$$

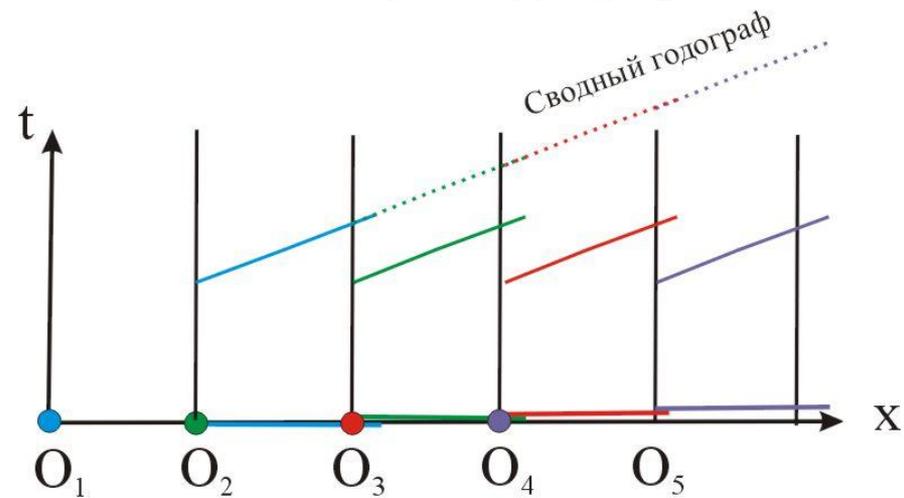
# Некоторые особенности преломленных волн

- На разрезах выделяется 5-7 преломляющих границ, каждая из которых может быть охарактеризована одним годографом. Строится серия годографов преломленных волн.
- Особенность МПВ – прослеживание границ на тем больших расстояниях от источника возбуждения, чем глубже эта граница залегает.
- В первом приближении уравнение годографа для двухслойной среды справедливо и для многослойной, если под  $V_1$  понимать  $V_{cp}$  в покрывающей среде.
- В МПВ помимо преломленных волн наблюдаются рефрагированные волны если  $V_p$  возрастает с глубиной (например, в связи с увеличением давления).
- Распознавание типа волны – большая проблема. Решение - анализ нагоняющих годографов: у преломленных волн они параллельны; у рефрагированных с удалением от источника годографы сближаются.

# Системы наблюдений МПВ

- Так как вблизи от источника преломленные волны не наблюдаются, то ближайший СП устанавливается на расстоянии, сопоставимом с предполагаемой глубиной залегания преломляющей границы.
- Уверенная интерпретация МПВ возможна лишь тогда, когда по линии профиля можно построить как минимум 2 годографа, полученных из разных источников возбуждения: встречных или нагоняющих.
- Так как нагоняющие годографы от одной границы параллельны, то по ним строятся сводные годографы путем параллельных смещений.
- Обычно применяются полные системы наблюдений, обеспечивающие прослеживание всех преломленных волн вдоль профиля наблюдений. Применяются системы непрерывного профилирования: через один, два, три интервала.

## Нагоняющие годографы



# Интерпретация данных МПВ

- Интерпретация сводится к определению:

$H$  – глубина залег. преломл. границы;

$\varphi$  – угол наклона преломл. границы;

$V_1 = V_2$  граничная скорость в преломляющем слое

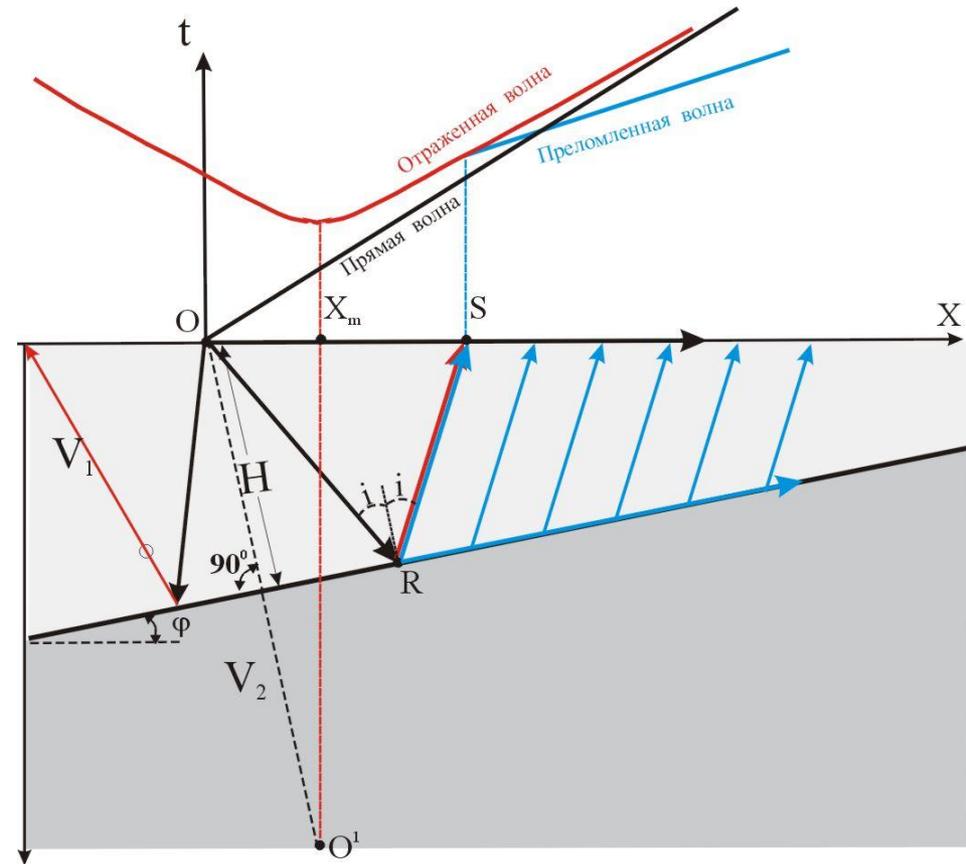
$V_{эф}$  в перекрывающей среде получают по данным сейсмокартатажа или МОВ.

- Надежно интерпретируются только встречные годографы.

$$1. \quad t = \frac{x}{V_1} \quad \text{Прямая волна}$$

$$2. \quad t = \frac{1}{V_1} \sqrt{x^2 + 4H^2 \pm 4Hx \cdot \cos \varphi} \quad \text{Отраженная волна}$$

$$3. \quad t = \frac{1}{V_1} \{x \cdot \sin(i \pm \varphi) + 2H \cdot \cos i\} \quad \text{Преломленная волна}$$



- Пусть имеются два годографа преломленных волн:

$$V_{cp} \text{ и } V_r = \text{const};$$

$$V_r (V_2) > V_{cp}$$

- Определим  $V_r$  по разностному годографу:

$$\Theta(x) = t_1(x) - t_2(x) + T$$

$t_1(x)$ -время прихода Пр.волны в точку  $x$  по первому годографу (от ист-ка  $O_1$ );

$t_2(x)$ -время прихода Пр.волны в точку  $x$  по второму годографу (от ист-ка  $O_2$ );

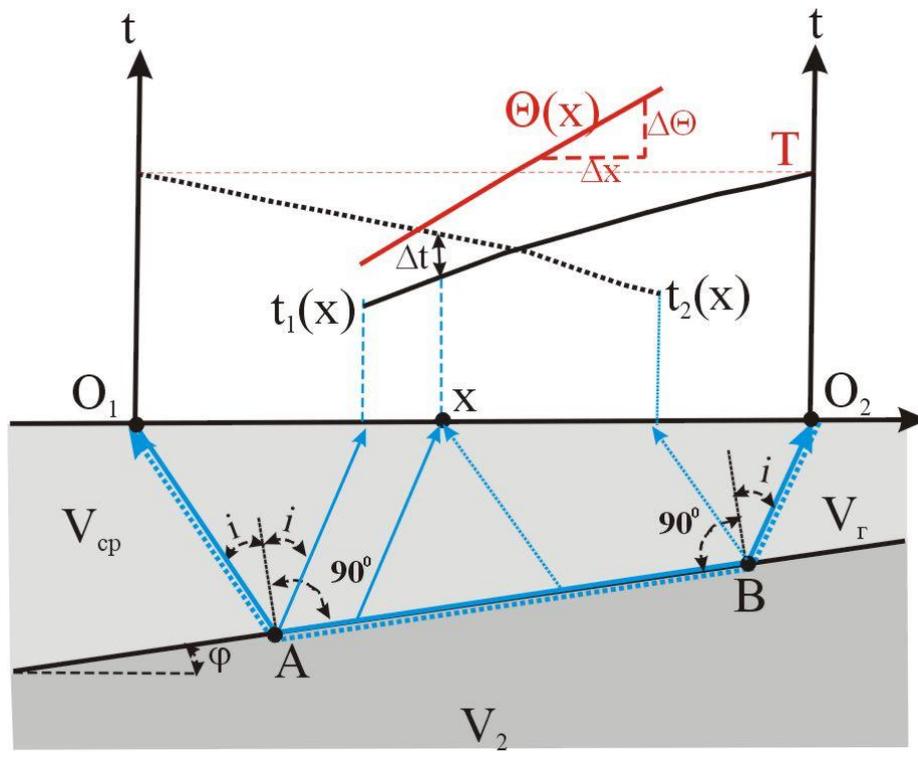
$T$  – время во взаимных точках (т.е. по трассе  $(O_1ABO_2)$  и наоборот.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{dt_1}{dx} - \frac{dt_2}{dx} \Rightarrow \frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{2 \cos \varphi}{V_r} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_r = \frac{2 \cos \varphi}{\Delta \Theta} \cdot \Delta x \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{при } \varphi \leq 10 - 15^\circ \quad V_r \approx 2 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta \Theta}$$

# Определение скорости по встречным годографам



# Общая схема обработки сейсмических материалов МОВ



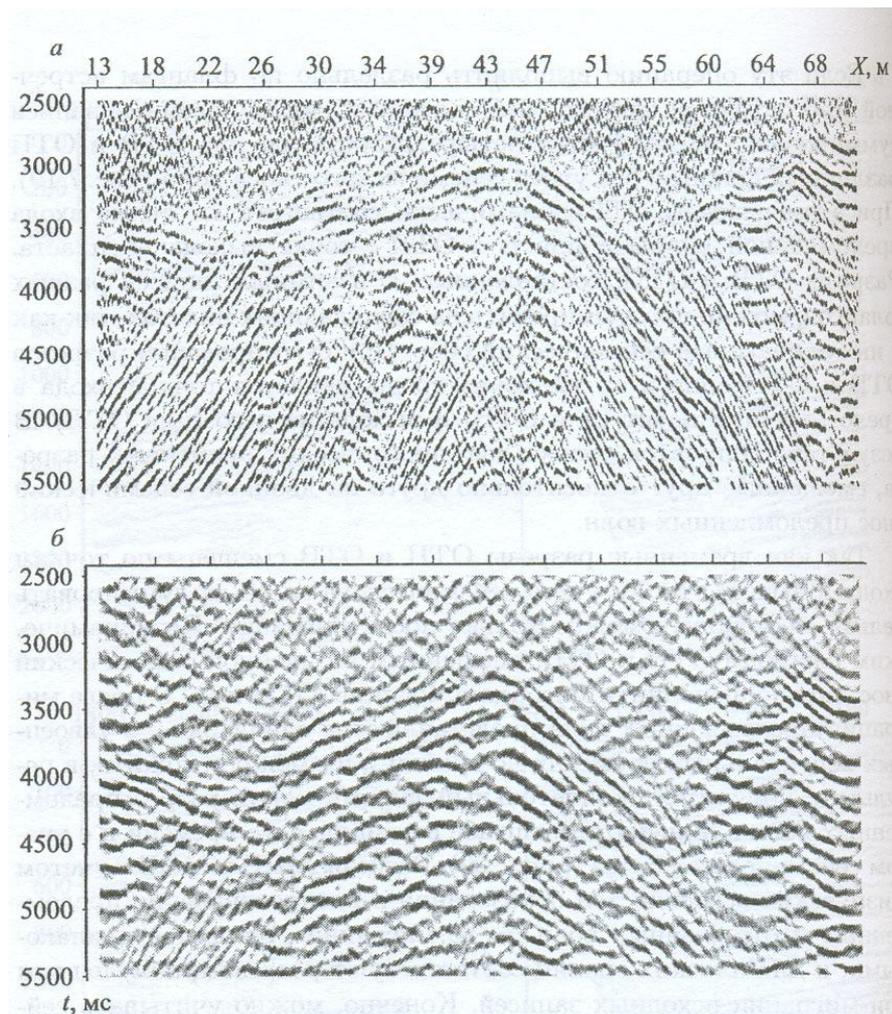
1. Изучение скоростей УВ – интерпретация годографов.
2. Выделение из волновой картины полезных сигналов без искажений и подавление помех (фильтрация).
3. Для определения истинного положения преломляющих границ необходимо учесть сейсмический снос преломленных волн, т.е. поместить полезные волны на те участки геологической среды, где они образовались. Эта операция наз-ся «**миграция**».
4. При возбуждении и распространении волн, а также при выполнении операций по ослаблению помех происходит понижение и сужение полосы частот. Операции повышения разрешенности сейсмических записей повышают детальность разреза.
5. Расчет акустической жесткости среды по амплитудам преломленных и дифрагированных волн-построение детального акустического разреза среды.

# Применение метода преломленных волн

- Метод преломленных волн широко используется при изучении верхней части геологического разреза (ВЧР) для определения глубины залегания, рельефа и разрывных нарушений фундамента, обнаружения соляных куполов, а также оценки мощности и упругих свойств глубинных уровней земной коры.
- Сейсморазведка МПВ начала применяться в геологии с 20-х годов XX столетия. Результаты МПВ обычно представляются в виде толстослойной модели упругих свойств: сейсмических разрезов, на которых изображаются преломляющие границы и приводятся значения граничных (пластовых) скоростей. Результаты обработки пока представляются с использованием главным образом кинематических параметров волн.
- Применение МОВ началось позднее МПВ. Быстрое развитие метода привело к использованию в обработке не только кинематических, но и динамических свойств волн, что ведет к повышению его эффективности. Объемы работ МОВ в десятки раз превышают объемы МПВ.

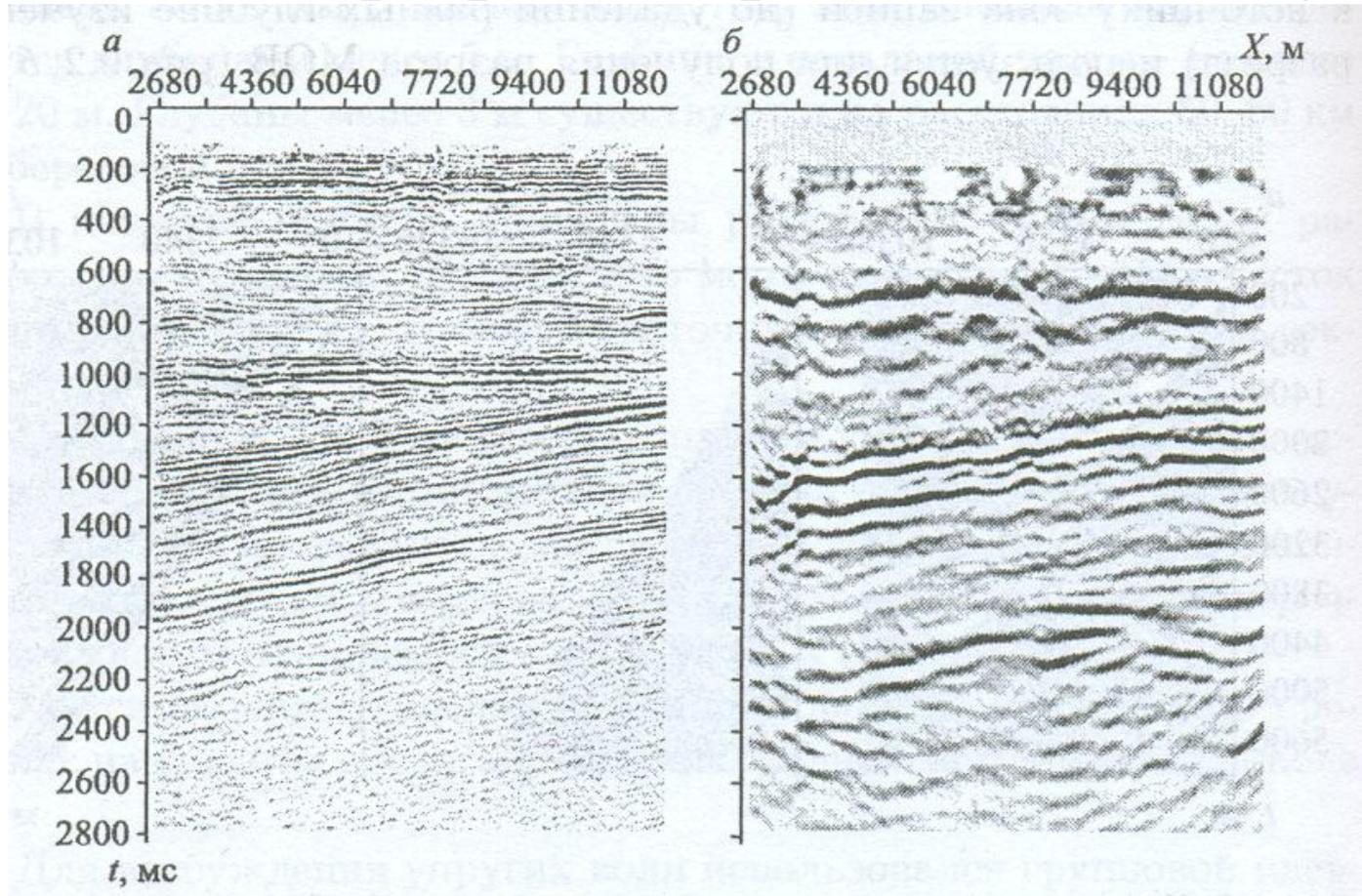
# Операции обработки сейсмических записей преломленных волн.

- При любой обработке сейсмических записей используются кинематические (времена прихода) и динамические (форма импульса) свойства волн. В процессе миграции формируется динамическое изображение преломляющей границы с учетом сейсмического сноса и увеличивается его кинематическое отличие от прочих волн. Происходит построение волнового изображения преломляющей границы любой конфигурации. Мигрированный разрез МПВ более низкочастотный в сравнении с МОВ.



Временной разрез МПВ до миграции (а)  
и после миграции (б).

# Сейсмические разрезы в транзитной зоне суша-море



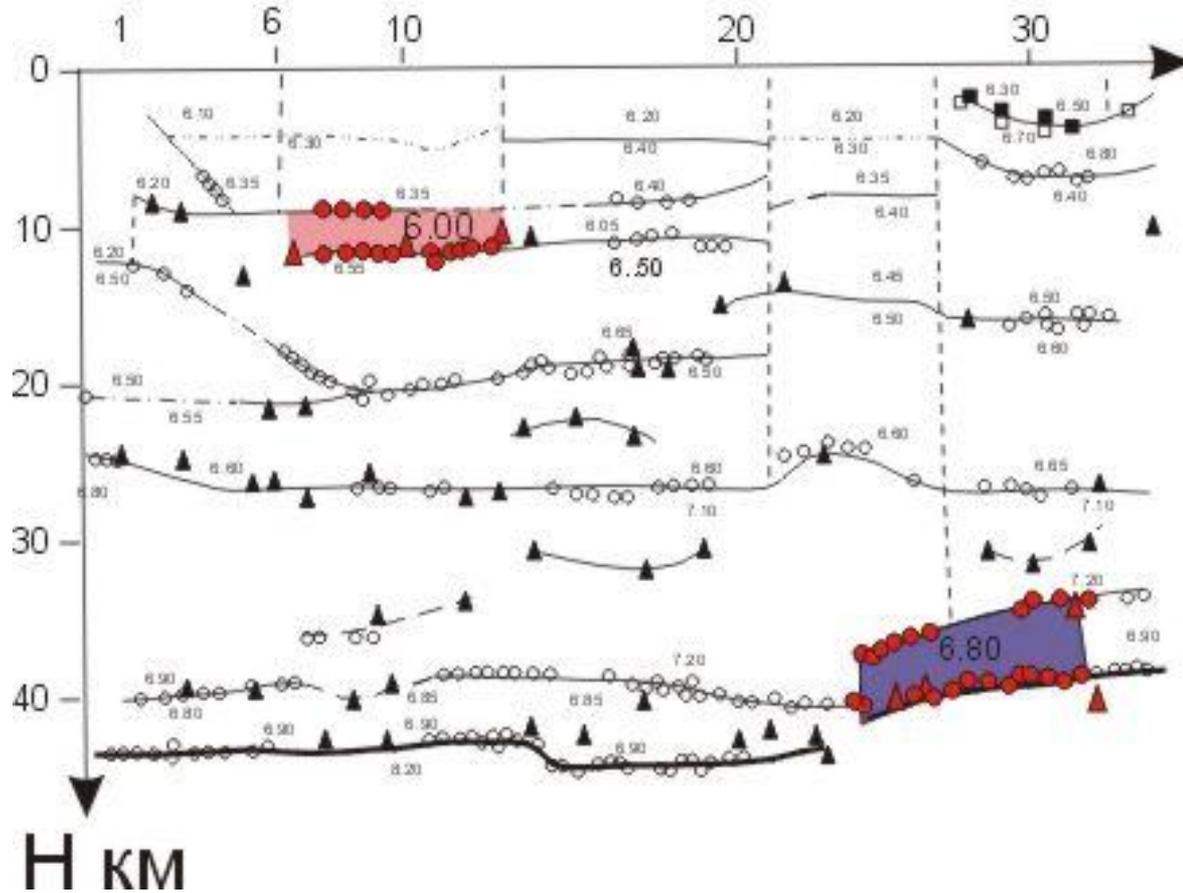
Работы направлены на поиски нефти и газа на шельфе. По временному разрезу МОВ (а) определяются положение отражающих границ, и  $V$  в покрывающей среде; амплитуды волн соответствуют коэффициентам отражения и по ним можно определить изменение акустической жесткости.

В МПВ (б) определяются положение преломляющих границ и граничные скорости; амплитуды волн на границах соответствуют коэффициентам преломления - по ним можно определить изменение акустической жесткости.

# Методика ГСЗ-МОВЗ

- Полевые наблюдения осуществлялись по методике точечного профилирования при регистрации трех компонент смещения почвы. Шаг между пунктами наблюдений составлял от 5 до 15 км, расстояние между пунктами взрыва 40-120 км. При отработке профилей ГСЗ произведено большое число малых взрывов, а также средние и попутные взрывы большой мощности, в том числе - ядерные.
- При отработке профиля «Кварц» (Мурманск-Кызыл) были выполнены три атомных и 80 химических взрывов. Максимальная дистанция наблюдения 3150 км соответствовала глубине проникновения рефрагированных волн около 700 км. Сейсмические разрезы составлялись методом математического моделирования: при решении прямой задачи осуществлялось до 6-7 переборов различных вариантов

## Скоростной разрез ГСЗ



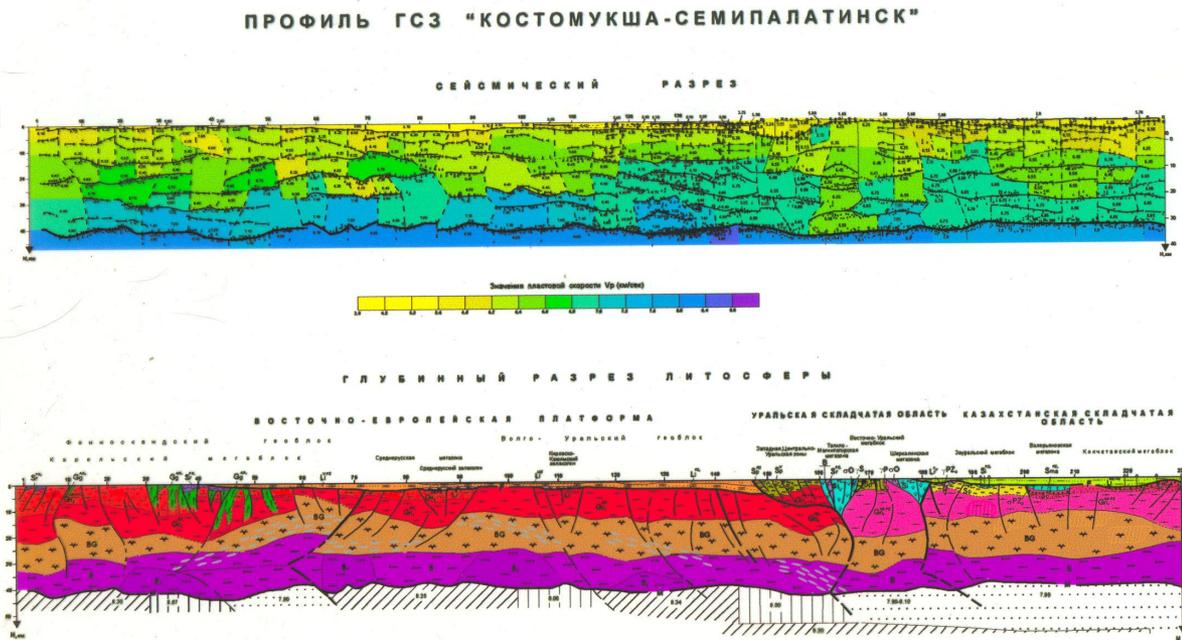
- Вдоль профилей регистрируются:
  - преломленные волны,
  - закритические ОВ,
  - обменные волны.
- Скоростная модель земной коры по данным ГСЗ представляется в виде системы блоков (доменов) толщиной 4-15 км и горизонтальной протяженностью 40-100 км, разделяемых субгоризонтальными, вертикальными и в некоторых случаях наклонными границами. Общей особенностью разрезов ГСЗ является малая детальность расчленения верхней толщи земной коры мощностью 10-15 км.

# Типовая модель радиальной расслоенности земной коры

- Увеличение скорости  $V_p$  с глубиной от 2,5 до 5,5 км/с в осадочном чехле и от 6,0 до 7,2 км/с в консолидированной земной коре.
- **«Нормальная» структура расслоенности блоков земной коры:**
  - - осадочно-вулканогенный с ( $V_p$  - от 2,5 до 5,5 км/с );
  - - верхнекоровый мегаслоя ( от 6,0 до 6,4 км/с)
  - - среднекоровый мегаслоя ( $V_p=6,5-6,6$  км/с;
  - - нижнекоровый мегаслоя ( $V_p=6,7-7,2$  км/с).

## Регионально прослеживаемые границы:

- $F_0$  – подошва осадочно-вулканогенного слоя;
- $K_1$  - подошва верхнекорового гранитно-метаморфического мегаслоя;
- $K_2$  - подошва среднекорового мегаслоя;
- $M$ - подошва коры (гр. Мохо)



# Изучение глубинного строения земной коры вдоль геотраверсов

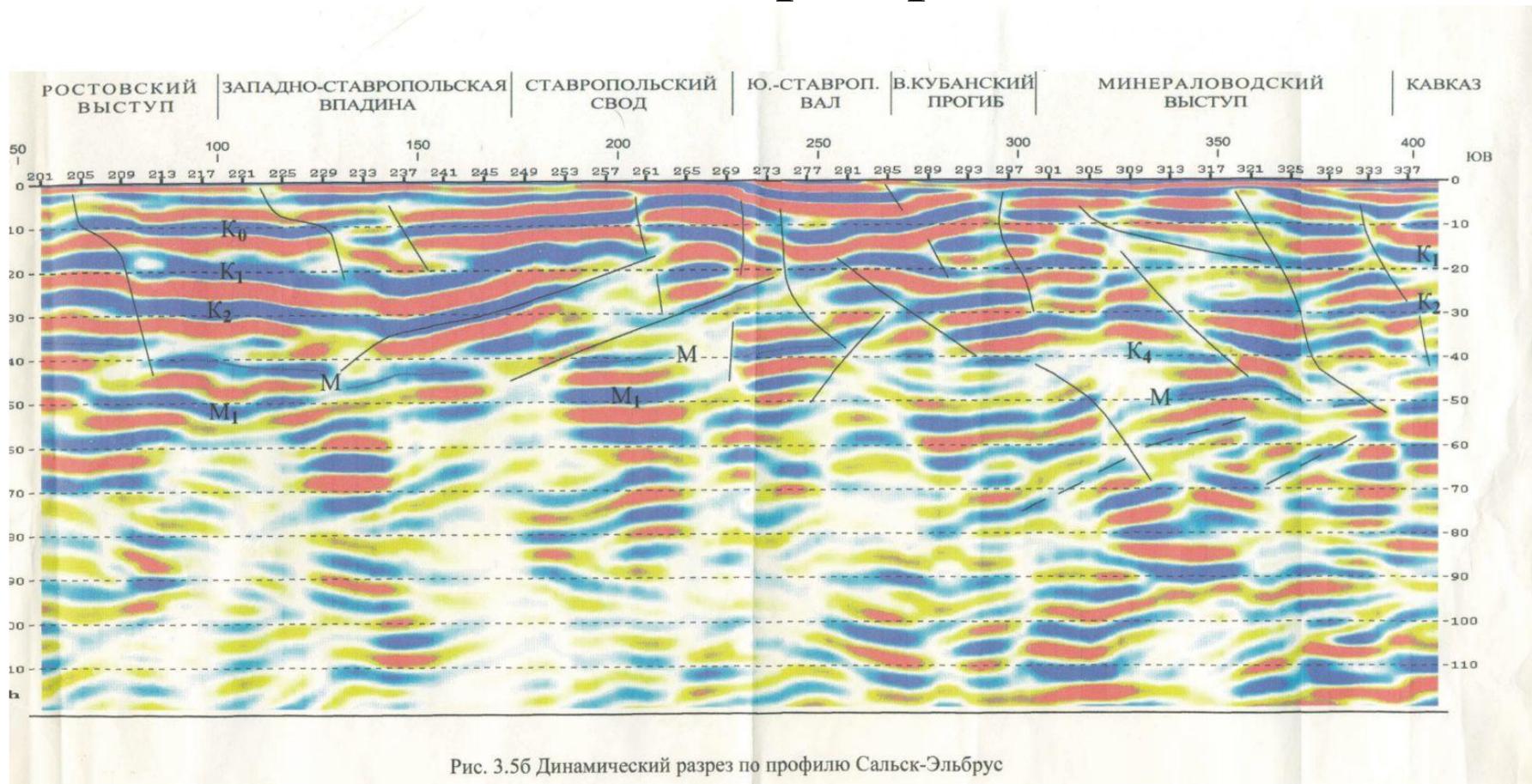
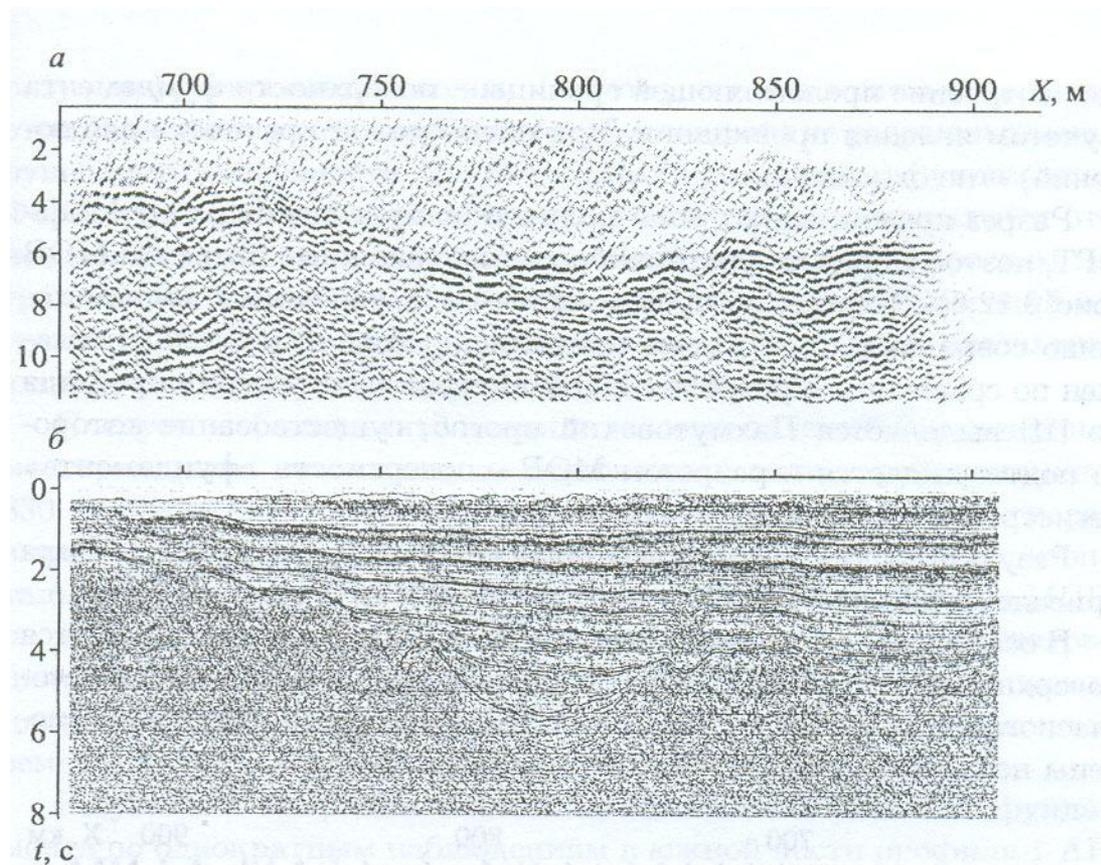


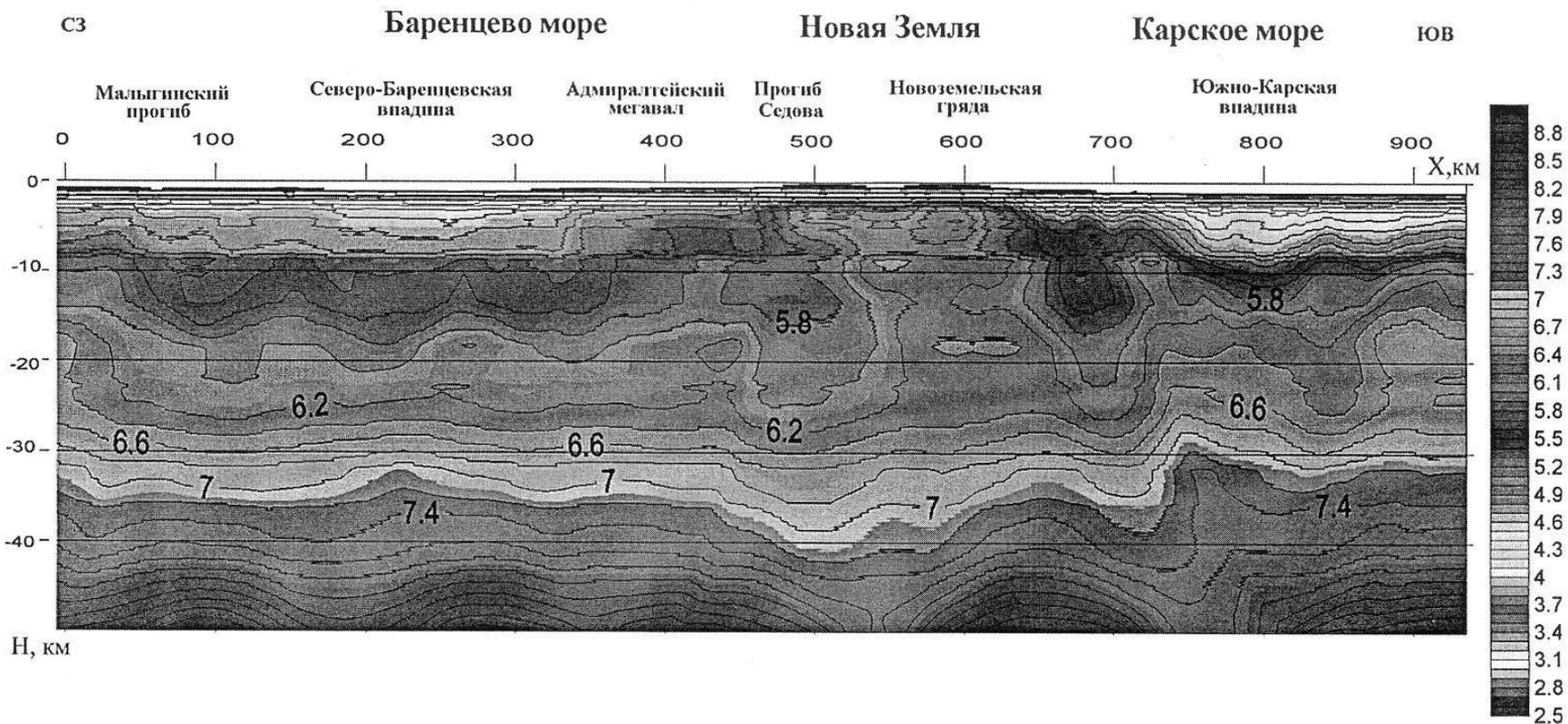
Рис. 3.56 Динамический разрез по профилю Сальск-Эльбрус

- В последние годы при обработке преломленных волн вдоль региональных профилей помимо кинематических строятся динамические разрезы.

# Изучение глубинного строения земной коры вдоль геотраверсов

- Фрагменты сейсмических разрезов по профилю 2-АР (Карское море).
- а) по миграции преломленных волн от поверхности фундамента;
- б) по материалам МОВ-ОГТ.
- Наибольший интерес представляет верхняя — осадочная часть разреза.





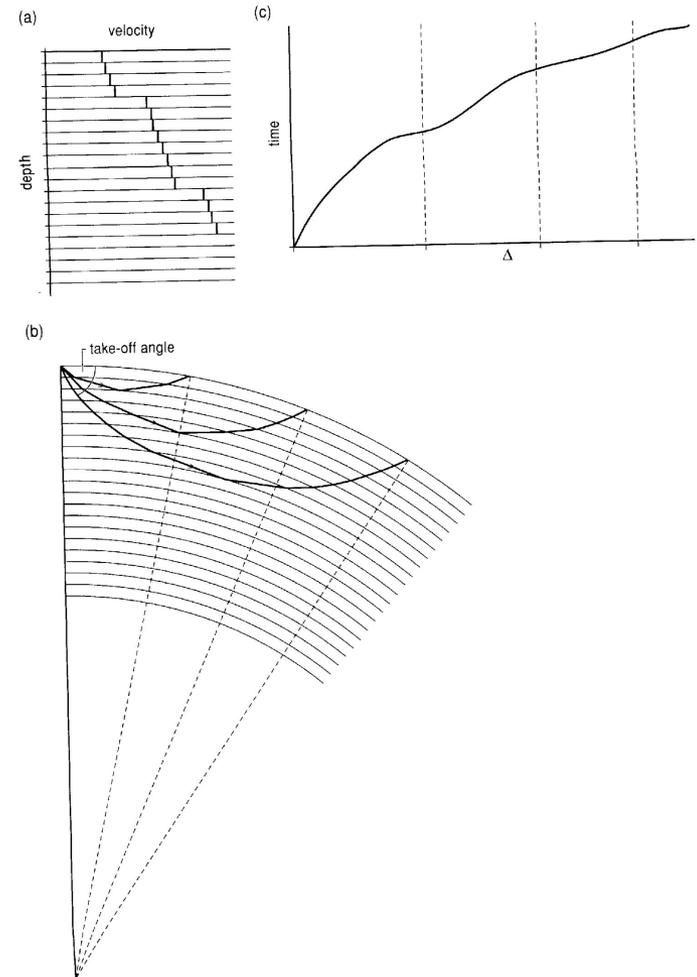
Сейсмотомографический разрез по профилю 2-АР

- По данным МПВ могут быть построены сейсмотомографические разрезы, позволяющие оценить строение глубинных горизонтов земной коры.

# Сейсмическая томография

- Томография – базовый метод изучения внутреннего строения (как Земли, так и человека).
- Для изучения «внутреннего строения» (томографии) Земли используются **«рефрагированные волны»**.
- Рефрагированные волны формируются в реальных условиях Земли, когда мы имеем расслоенную среду с нарастанием скорости с глубиной. Трасса прохождения лучей будет выполаживаться.
- В зависимости от базы наблюдений (расстояние источник УВ- приемник) мы получаем набор разноглубинных зондов

Figure 4.14. Representing the Earth by many shells.



# Сейсмическая модель Земли.

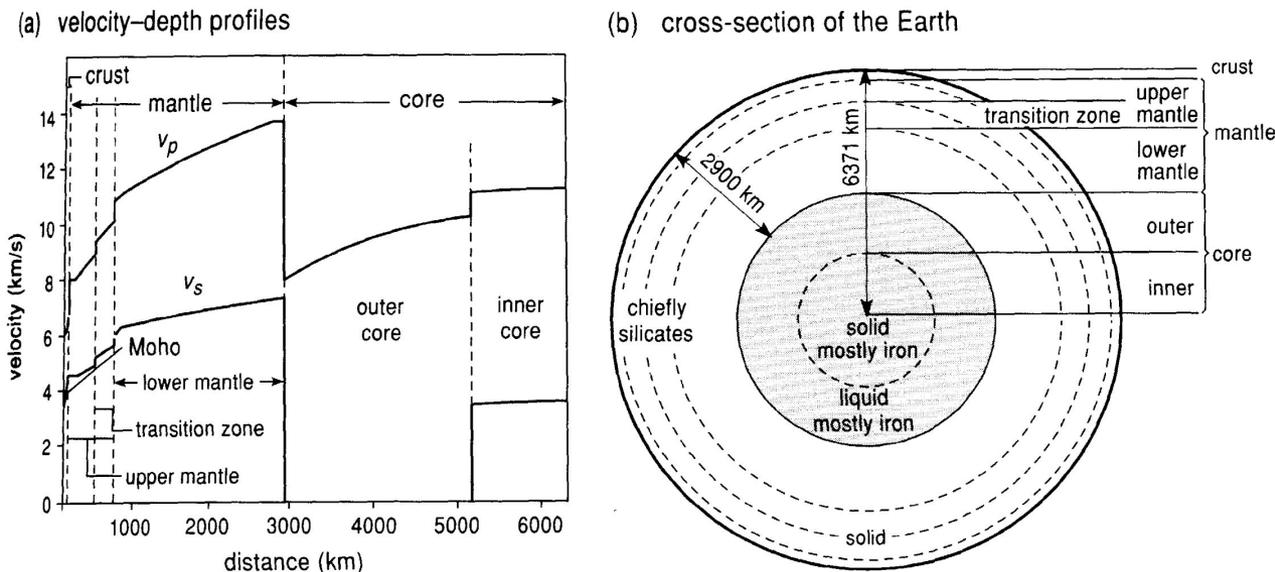


Figure 4.15 Velocity–depth curves for P- and S-waves, and the Earth’s structure.

- Структура расслоенности Земли установлена по сейсмологическим данным.
- Земная кора –  $V_p = 2.3- 7.2$  км/сек. На границе Мохо – резкий скачек до 7.8-8.4 км/сек.
- Граница Голицина – 400 км. М – резко увеличивается. Объясняется фазовым переходом доминирующих минералов (оливин, пироксен) в более компактную форму (аналогично переходу графита в алмаз). Область 400-600 км переходная зона верхней мантии.
- Граница 660 км-разделяет верхнюю и нижнюю мантию. Предполагается фазовый переход минералов. Возможен небольшой вещественный переход.
- Ниже 660 км  $V_p$  и  $V_s$  плавно увеличиваются за исключением нижних 200 км (слой D). Он выделяется как более высокой температурой, так и несколько отличным составом.
- 2700 км- граница ядра. Ядро делится на внешнее и внутреннее.

## Изучение скоростных неоднородностей Земли на заданном глубинном уровне

- Пример. Пусть лучи имеют одинаковую протяженность. Время прихода волн по трассам:  $AA^1$ ,  $BB^1$ ,  $CC^1$ ,  $HH^1$  - одинаково (стандарт).
- Время прихода волн по трассам:  $DD^1$ ,  $EE^1$ ,  $FF^1$ ,  $GG^1$  - увеличено (уменьшено) по отношению к стандарту.
- Различия во времени прихода по отношению к стандарту таких волн – первые проценты при нижней точке луча –несколько сотен км.
- В нижней мантии изменения  $V_p$  и  $V_s$  - менее 1%. У  $V_s$  различия больше чем у  $V_p$ .

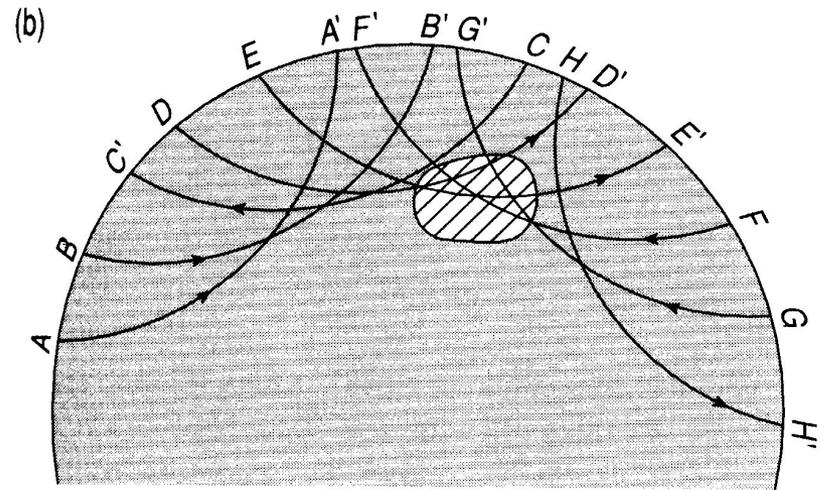


Figure 4.21 Simple tomographic example.

# Примеры сейсмотомографических разрезов

- Томография очень важна, так как может фиксировать вариации сейсмических скоростей, латеральные или вертикальные, которые не разделяются контрастными сейсмическими границами.
- Томографические разрезы ОД Тонга-Кермадек показывают, что субдуцирующая плита (слэб) проявляется как зона повышенных скоростей, т.к. ее температура ниже, чем у окружающих мантийных образований. Плита изгибается на границе верхней и нижней мантии (660 км).

