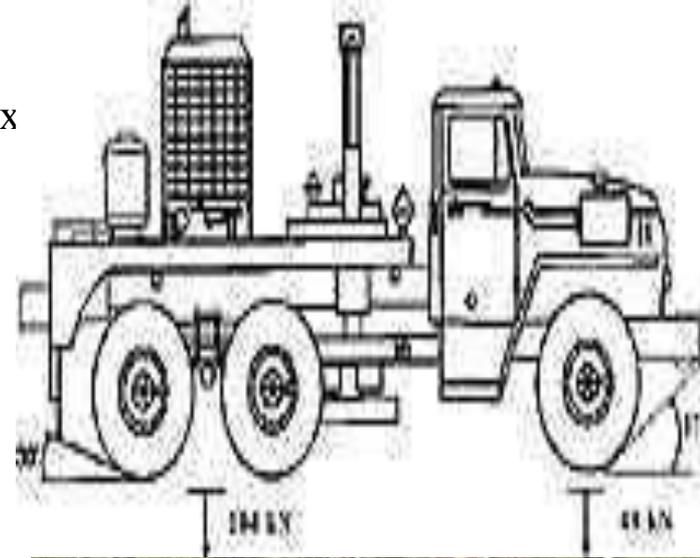


Введение

- **Сейморазведка**- геофизический метод исследования земной коры, поисков и разведки полезных ископаемых, основанный на изучении характера распространения упругих волн.
- **Источники** возбуждения упругих волн:
 - взрывы,
 - невзрывные источники (вибраторы, кувалда, естественные шумы),
 - землетрясения.
- Горные породы обладают различными **скоростями распространения упругих волн и плотностями**: это вызывает формирование на границах слоев и отдельных тел отраженных преломленных и обменных волн.
- Сейморазведка основана на изучении:
 - **кинематики волн** – времени пробега волны от источника до приемника;
 - **динамики волн** – интенсивности, формы, частоты, длительности колебаний.
- **Методика и техника с/р** предназначены для возбуждения упругих волн, улавливание волн, преобразование волн в энергетические импульсы, их усиление и фиксация на сейсмограммах.
- Обработка сейсмограмм – выделение различных типов волн, определение времени их прихода.
- **Количественная интерпретация** – расчет скорости распространения волн и их изменения в разрезе и объеме; оценка глубины сейсмических границ, их падения и простирания; построение сейсмогеологического разреза (с использованием геологических данных).



Методы сейсморазведки

- Выделяется 3 основных метода сейсморазведки:
 - метод преломленных волн (МПВ);
 - метод отраженных волн (МОВ);
- По решаемым задачам выделяется:
 - глубинная с/р;
 - нефтегазовая с/р;
 - рудная с/р;
 - инженерно-геологическая с/р.
- По условиям проведения выделяются:
 - наземная с/р;
 - морская с/р;
 - скважинная с/р;
 - подземная с/р.

Продольные, поперечные, поверхностные ВОЛНЫ

- Продольные и поперечные волны можно представить, толкая пружину или качая веревку за их конец.
- **Длина волны (λ)** – повторяющееся расстояние между гребнями или прогибами,
- **Амплитуда волны** – максимальное отклонение от стационарной позиции.

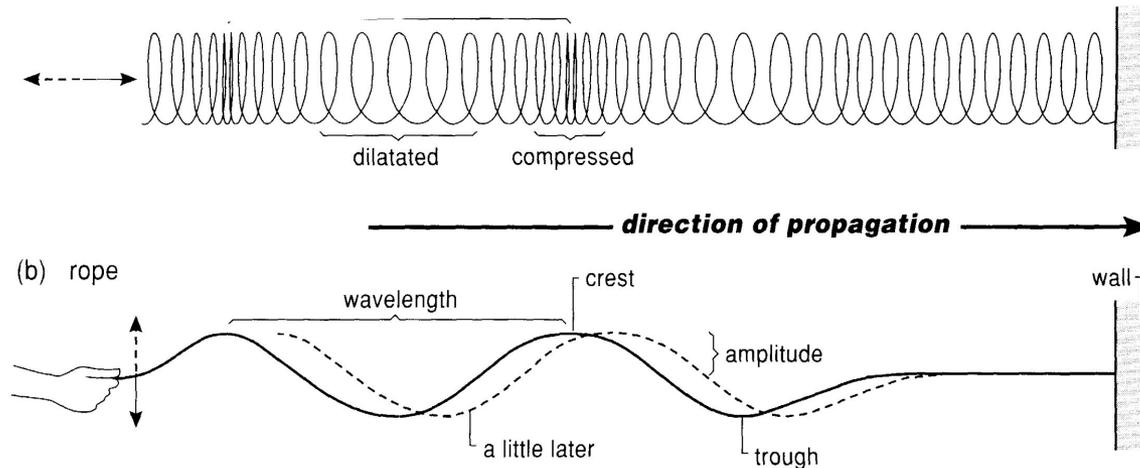


Figure 4.1 Waves along a spring and a rope.

Волна движется²⁴ с определенной скоростью – **сейсмическая скорость** – V (км/с).
Число гребней (прогибов), проходящих через фиксированную точку в одну секунду – **частота** – f (Гц).

$$V = f \cdot \lambda$$

- Волна движется с определенной скоростью – **сейсмическая скорость** V

- Число гребней или прогибов, проходящих через фиксированную точку в 1 секунду – **частота (Гц) - f**

$$V = f \times \lambda$$

- **Импульс** очень короткая серия волн (самый простой случай – один гребень и один прогиб). Могут создаваться взрывами.

- Часто возбуждение колебаний – в скважинах. Быстрое расширение – создает сжатие, которое распространяется во все стороны. Точки среды возвращаются в исходное положение – растяжение.

- Сжатие имеет сферическую форму – **волновой фронт**.

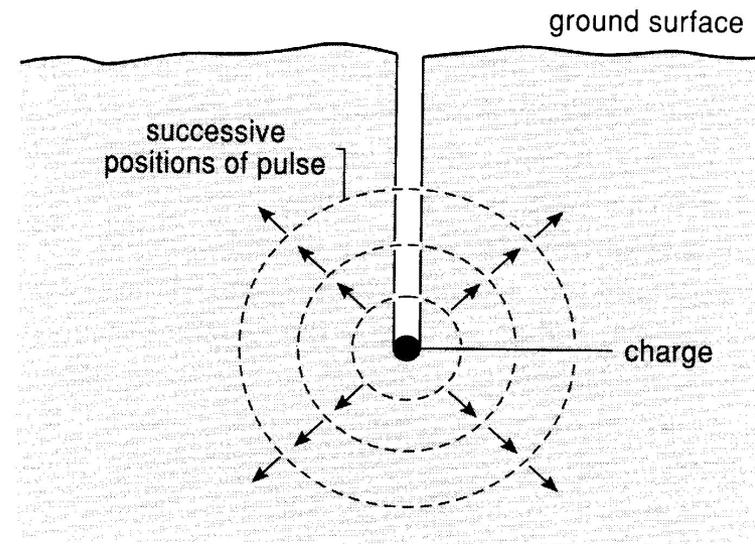
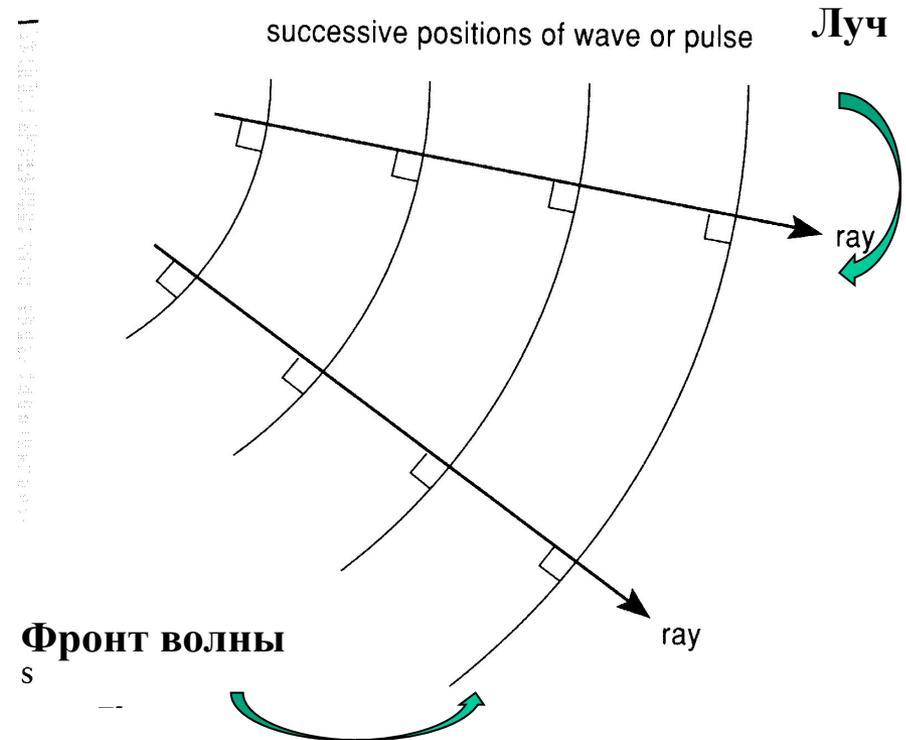


Figure 4.4 Pulse generation by an explosion.

Основные положения геометрической оптики

- Распространение упругих волн в горных породах базируется на принципах геометрической оптики.
- **Фронт волны**- поверхность, ограничивающая области, где среда деформирована под воздействием упругой волны и область, куда волна еще не дошла. Вблизи от источника фронт близок по форме к сфере. На удалении его можно считать плоским.
- **Сейсмический луч** – линия, перпендикулярная фронту.



Законы отражения и преломления

- Из принципа Ферма вытекают законы:

- **Закон отражения**

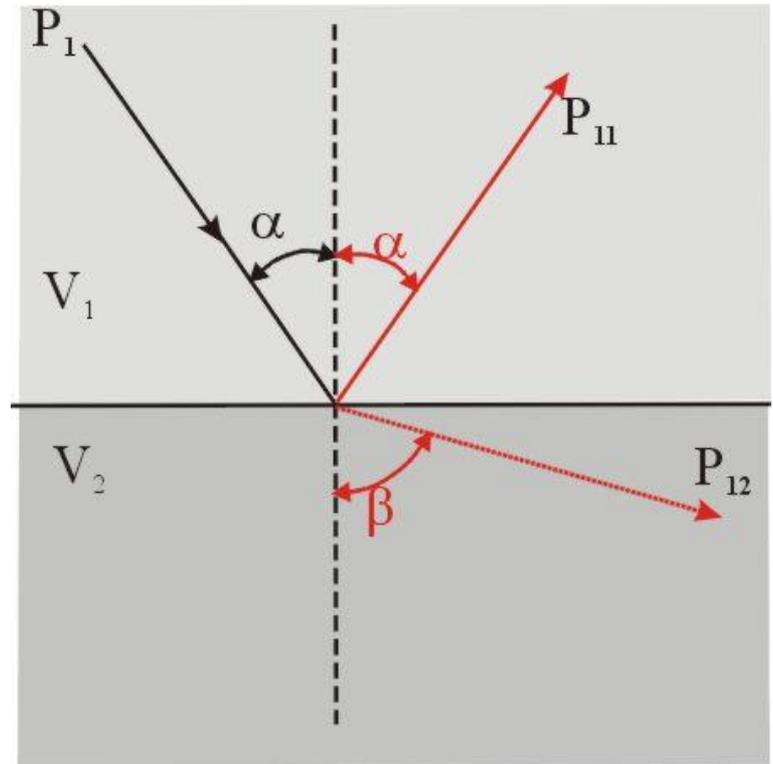
$$\frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \alpha_2}{V_2}$$

Если луч – в одной среде (V_1), то $\alpha_1 = \alpha_2$ Угол падения равен углу отражения.

- **Закон преломления.**

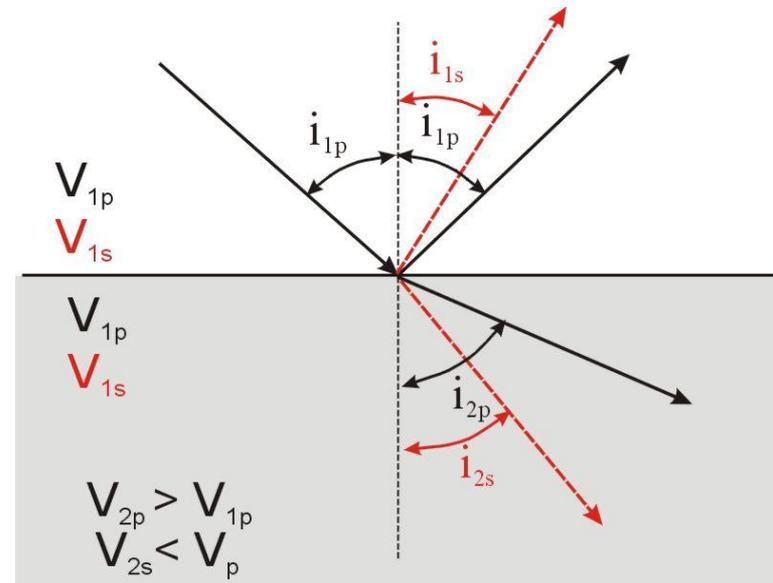
$$\frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \beta}{V_2}$$

α –угол падения, β –угол преломления.



Продольные и поперечные волны

- Т.к. P и S волны по разному деформируют породы скорость их прохождения различна. P – волны приходят раньше S волн.
- Т.к. жидкие среды могут принимать любую форму –они не сопротивляются поперечным деформациям - S волны не проходят.
- P и S волны создаются большинством сейсмических источников. Кроме того, они создаются в результате «волновой конверсии».
- P волны – отражаются и преломляются,
- S волны – отражаются и преломляются



$$\frac{\sin i_{1p}}{V_{1p}} = \frac{\sin i_{1s}}{V_{1s}} \quad \text{отраженные}$$

$$\frac{\sin i_{1p}}{V_{1p}} = \frac{\sin i_{2s}}{V_{2s}} \quad \text{преломленные}$$

Типы волн

- **Отраженные волны (ОВ).**

«Акустическая жесткость = σV » -
необходимое условие формирования
ОВ.

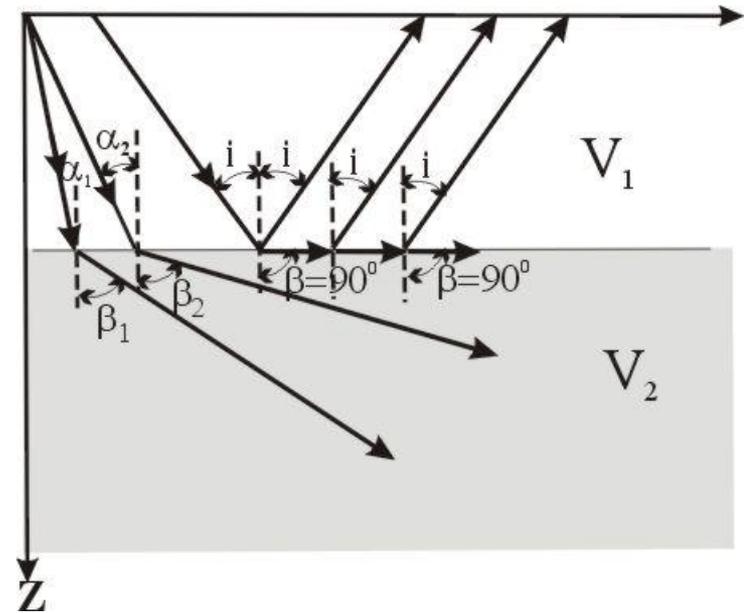
Коэф. Отражения
$$A_{pp} = \frac{(\sigma_2 \cdot V_2) \cdot (\sigma_1 \cdot V_1)}{\sigma_2 \cdot V_2 + \sigma_1 \cdot V_1}$$

- сильные акуст. границы - $A_{pp} > 0.5$

- средние акуст. границы - $0.1 < A_{pp} < 0.5$

- слабые акуст. границы $A_{pp} < 0.1$

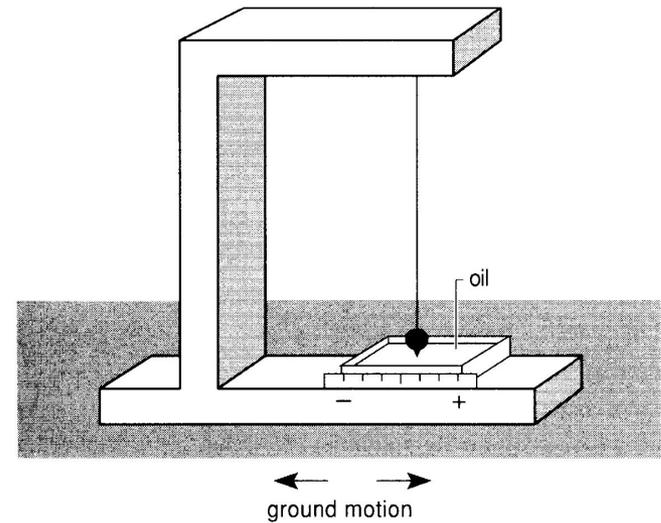
- **Преломленные волны (ПВ).**



Измерения сейсмических волн. Сейсмографы и геофоны.

- а) При смещении поверхности Земли влево – рама сместится влево – грузик в силу инерции останется на месте – индикатор покажет смещение.
- б) При смещении поверхности Земли в вертикальном измерении – рама сместится вверх - индикатор на грузике покажет вертикальное смещение.

(a) horizontal motion



(b) vertical motion

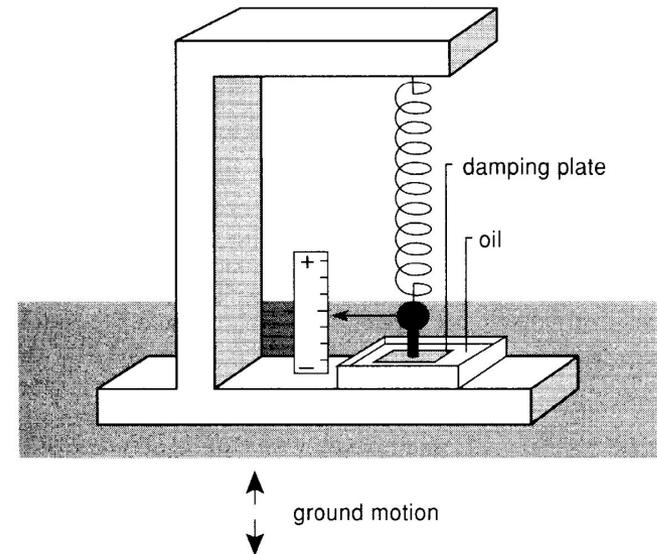


Figure 4.6 Principle of seismometers and geophones.

Сейсмографы и геофоны.

- Реальные инструменты – компактнее. Обычно – магнит помещенный в катушку.
- **Сейсмограф** используется в глобальной сейсмологии и предназначен для измерения очень слабых сигналов. Сейсмограф может зафиксировать движение человека в километре от прибора.
- **Геофоны** – используются в сейсморазведке – компактнее, но менее чувствительны.
- Сейсмограф и геофон – **сейсмоприемник**.
- Для получения полной информации о движении волны используются 3 приемника (иногда компануются в один прибор) . Обеспечивается измерение вертикальной и двух горизонтальных компонент смещений поверхности Земли.

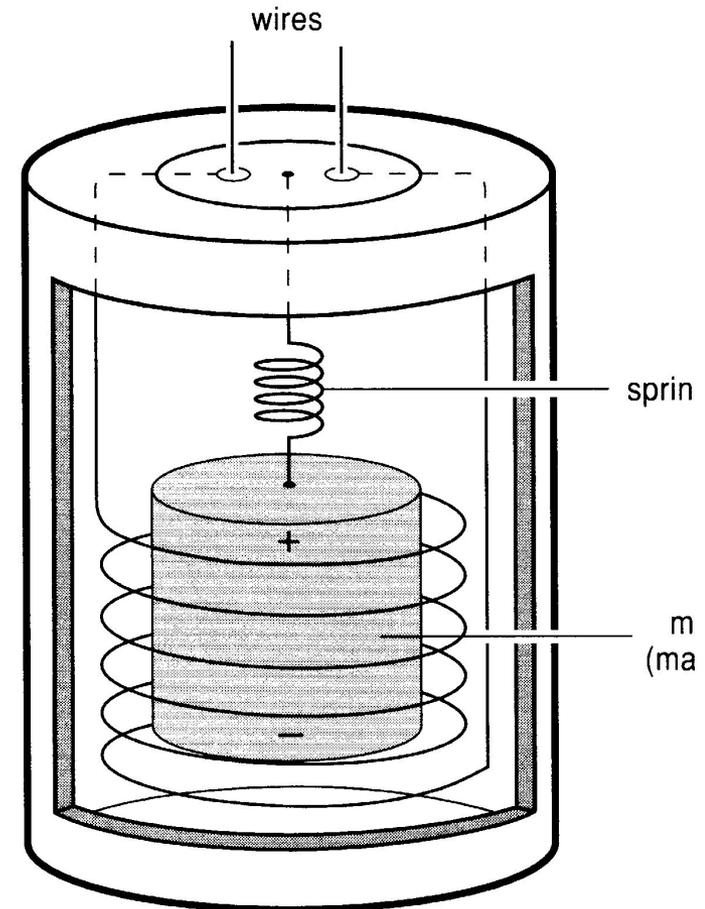
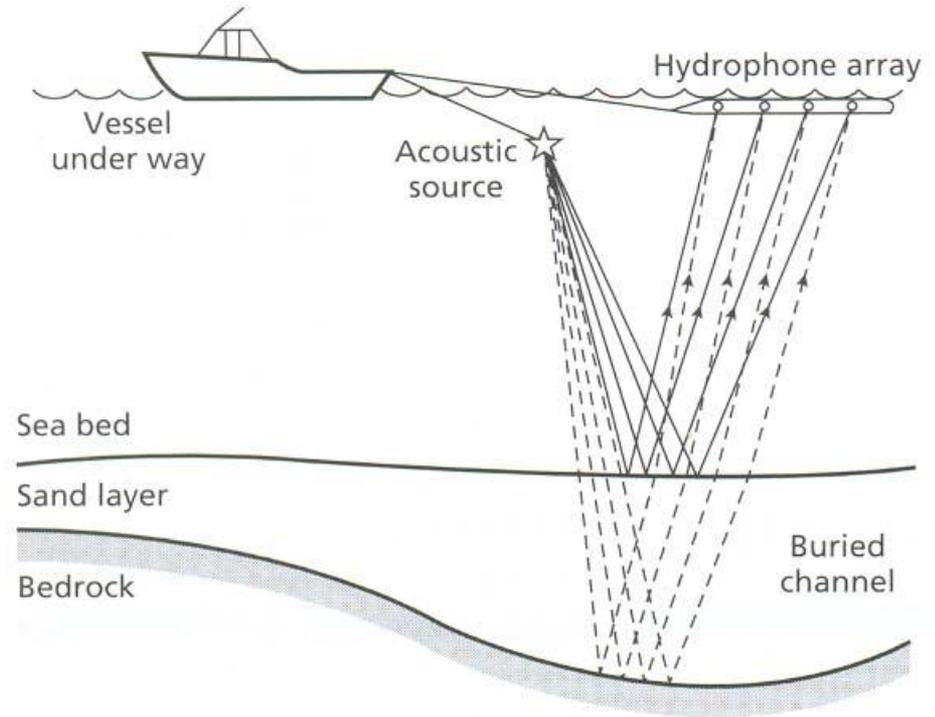


Figure 4.7 Moving-magnet seismometer.

1. Метод отраженных волн

- Это основной метод, которым обрабатываются основные объемы сейсморазведочных работ. Главная сфера применения – поиски, разведки и контроль эксплуатации месторождений углеводородов (газ, нефть, конденсат).
- Помимо исследований УВ применяется в региональных исследованиях глубинного строения земной коры и в исследовании рудных районов.
- Имеет применение в инженерной геологии (т.н. малоглубинная сейсморазведка).
- Характеризуется высочайшим в геофизике уровнем развития технической базы и технологии.



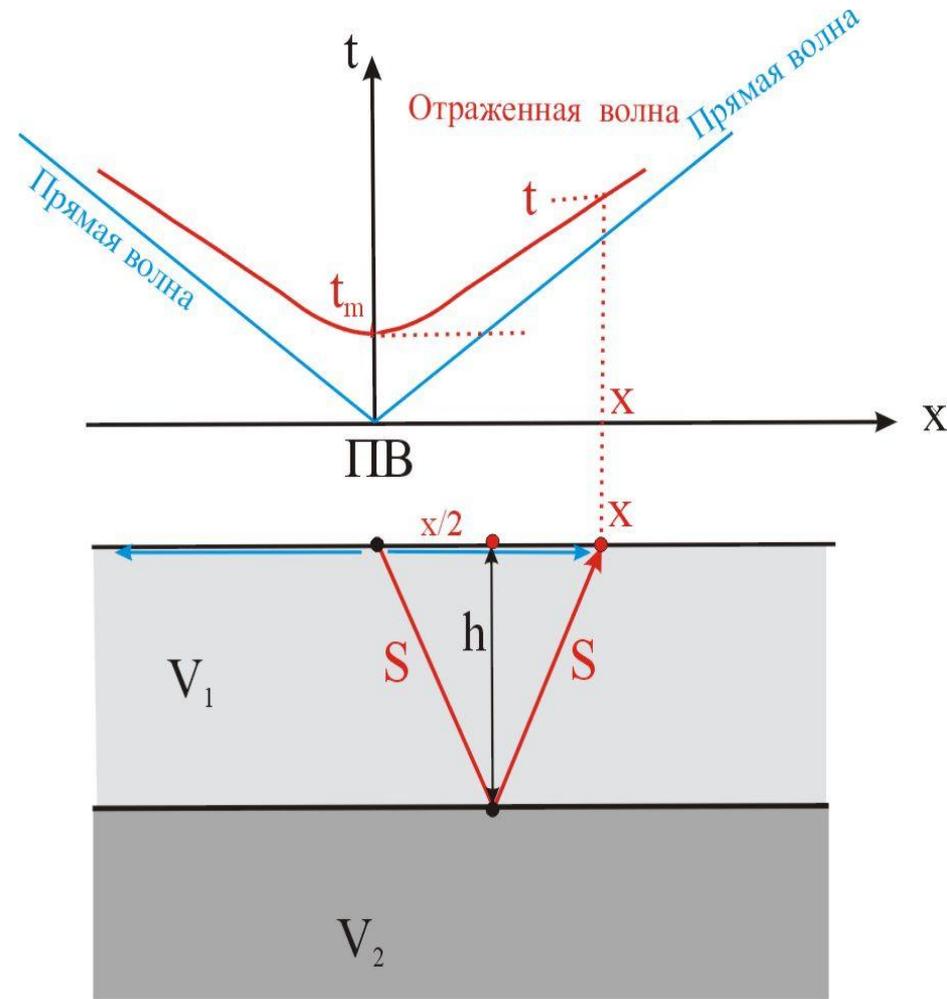
Прямая задача сейсморазведки

- Двухслойный разрез с одной отражающей горизонтальной границей.
- Скорости слоев V_1 и V_2 ; глубина отражающей границы – h .
- Если на границе $\sigma \cdot V_1 \neq \sigma \cdot V_2$ то образуется отраженная волна.
- Формула годографа (графика зависимости времени прихода отраженной волны от расстояния) определяется расчетом:

$$t = \frac{2S}{V_1}; \quad S = \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + h^2} \Rightarrow$$

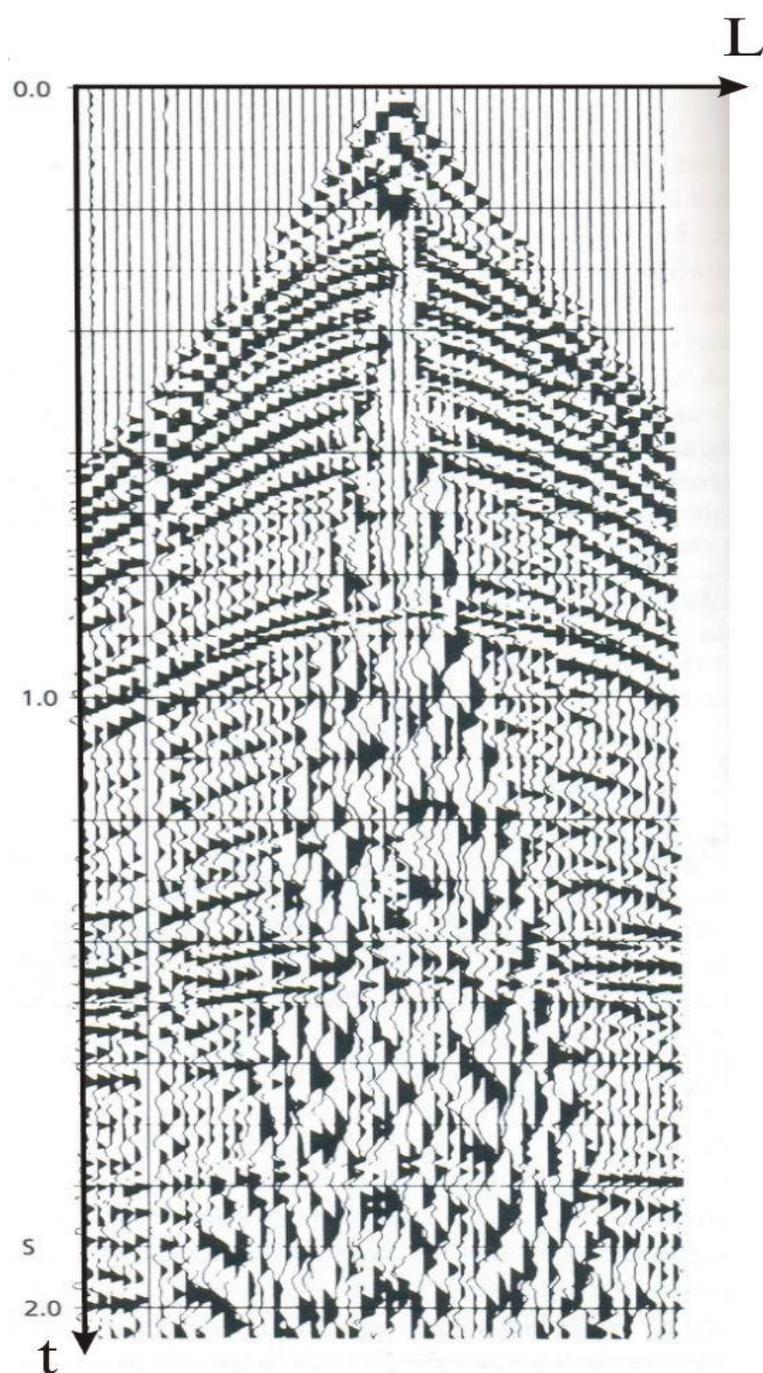
$$t = \frac{1}{V_1} \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

- Годограф имеет форму гиперболы, ось которой параллельна оси t .
- Гипербола асимптотически приближается к линии годографа прямой волны.



Сейсмограммы

- На сейсмограммах записи отнесены ко времени регистрации t . Точки разреза не в равном положении: под источником возбуждения УВ – это $h=Vxt$; в других точках сигнал запаздывает за счет того, что источник и приемник разнесены и трасса луча становится больше.
 - Первые вступления – прямые волны.
 - Отражения от границ (субгоризонтальных) имеют характерную гиперболическую форму.
 - Поздние вступления – шум.
-
- Отраженные волны формируются на всех протяженных слоях со скачками акустической жесткости и углами наклона менее 40° .
 - Приведенное выше уравнение годографа для двухслойного разреза справедливо и для разрезов, в которых покрывающая отражающий слой толща сложена различным количеством слоев с постоянными и меняющимися скоростями V . При выполнении расчетов в формуле значение V_1 следует заменить на $V_{\text{ср}}$ в покрывающей среде.



Методика проведения сейсморазведки МОВ

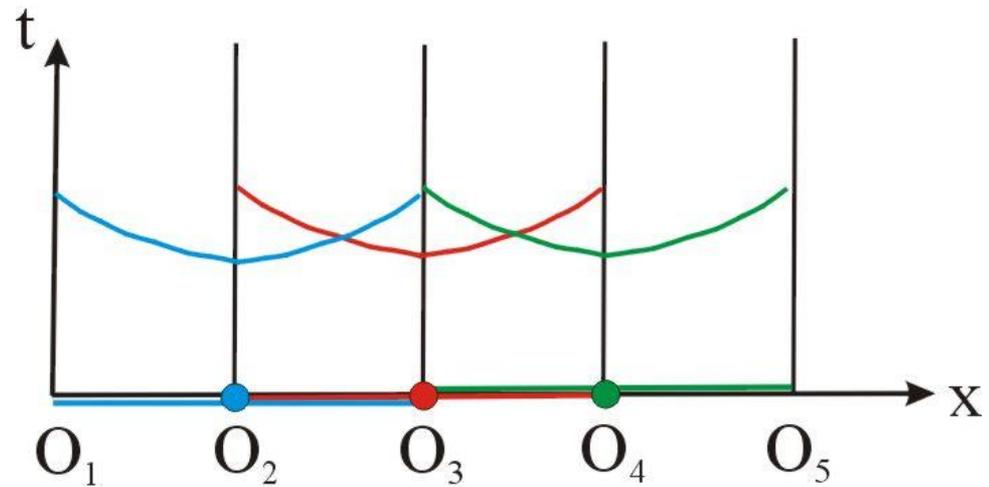
- Методика проведения полевых наблюдений должна обеспечивать уверенное прослеживание отражающих границ.

- **Непрерывное сейсмическое профилирование** – система наблюдений, обеспечивающая непрерывность изучения сейсмических границ:

Сейсмоприемники (СП) устанавливаются симметрично относительно источника.

- **Источник O_3 ; наблюдения O_2-O_4 .**
- **Источник O_4 ; наблюдения O_3-O_5 .**
- **Источник O_2 ; наблюдения O_1-O_3 .**

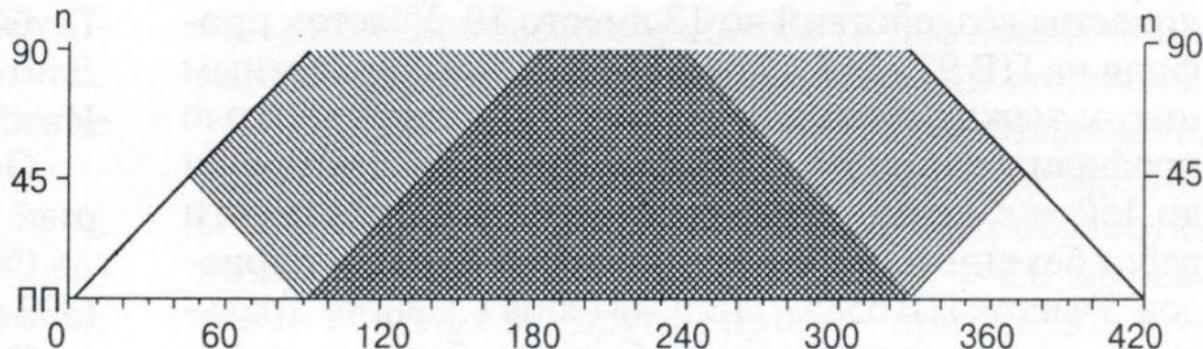
Простое профилирование



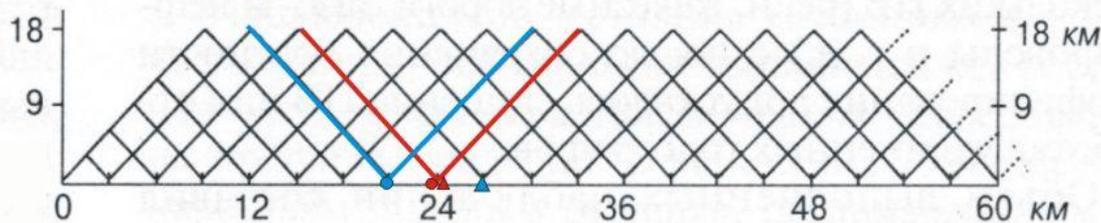
Обозначения расстановки

- При обработке профиля МОВ-ОГТ «Уралсейс» была использована встречно-фланговая система наблюдений.
- При работе со взрывным источником – 6-ти кратное перекрытие; с вибрационным источником – 60-ти кратное перекрытие.

МОВ-ОГТ ВСМ

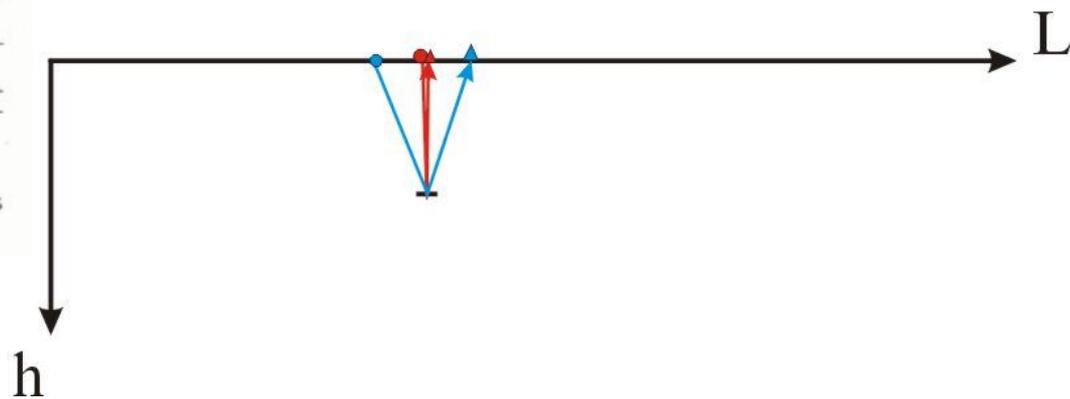


МОВ-ОГТ ВВ



A2: МОГТ. Взрывы

- Длина профиля - 510 км
- Регистрирующая система "Input/Output" - 2
- Два физических наблюдения на одном пункте взрыва
- Длительность записи - 65 с
- Встречно-фланговая система
- Длина рабочей расстановки сейсмоприемников - 18 км
- Максимальное расстояние ПВ-ПП - 18 км
- Кратность перекрытия - 6



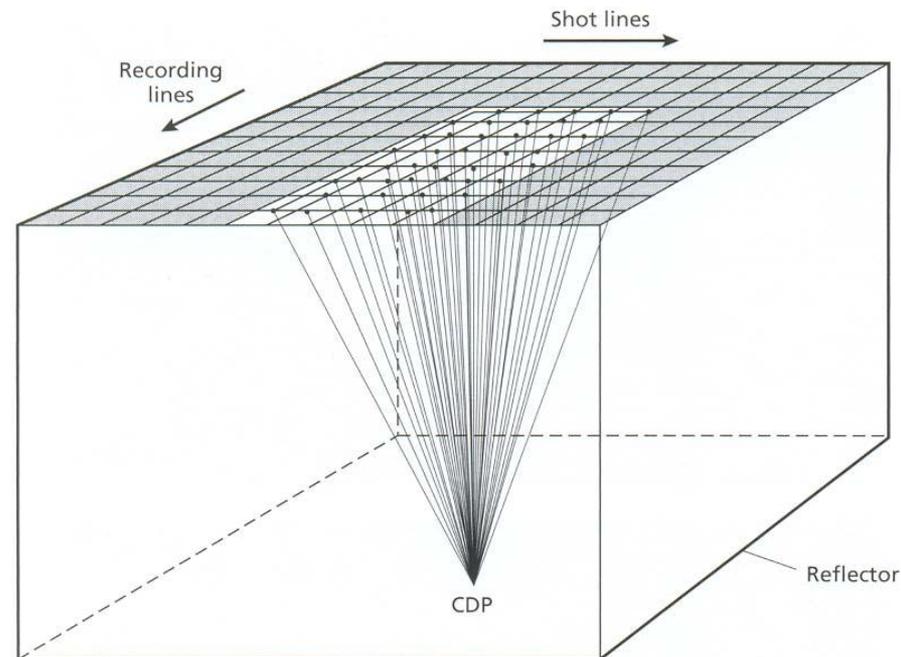
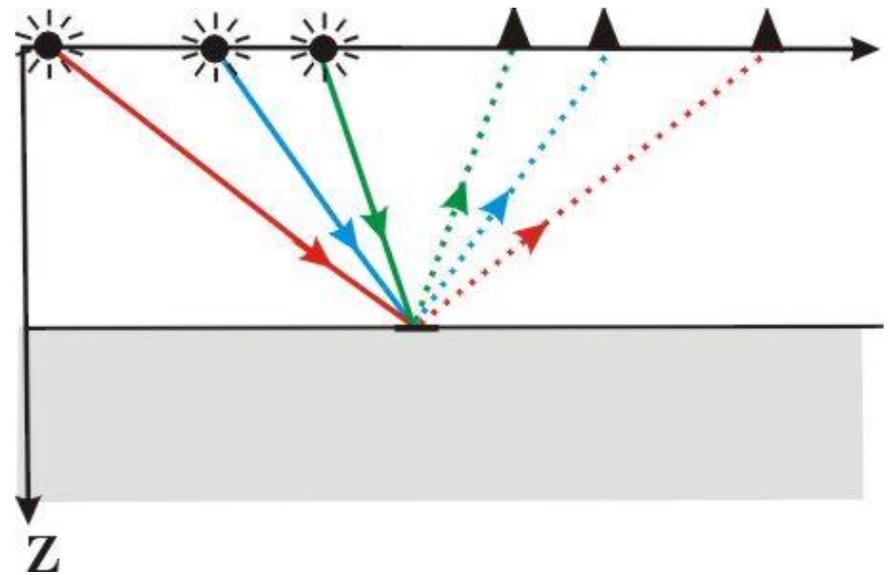
Методика проведения сейсморазведки МОВ

- **Метод общей глубинной точки (МОВ-ОГТ, МОГТ).**

Сущность МОГТ – профилирование по системе многократных перекрытий, при которой источник и приемник симметрично разносятся от центра установки, расположенной над изучаемым отражающим элементом («общей глубинной точкой»).

Если просуммировать полученные сейсмограммы, то отражения от одной и той же границы усиливаются.

По данным суммарной сейсмограммы можно определить время вступления ОВ и построить годограф ОГТ, обработка которого



Построение временных

разрезов

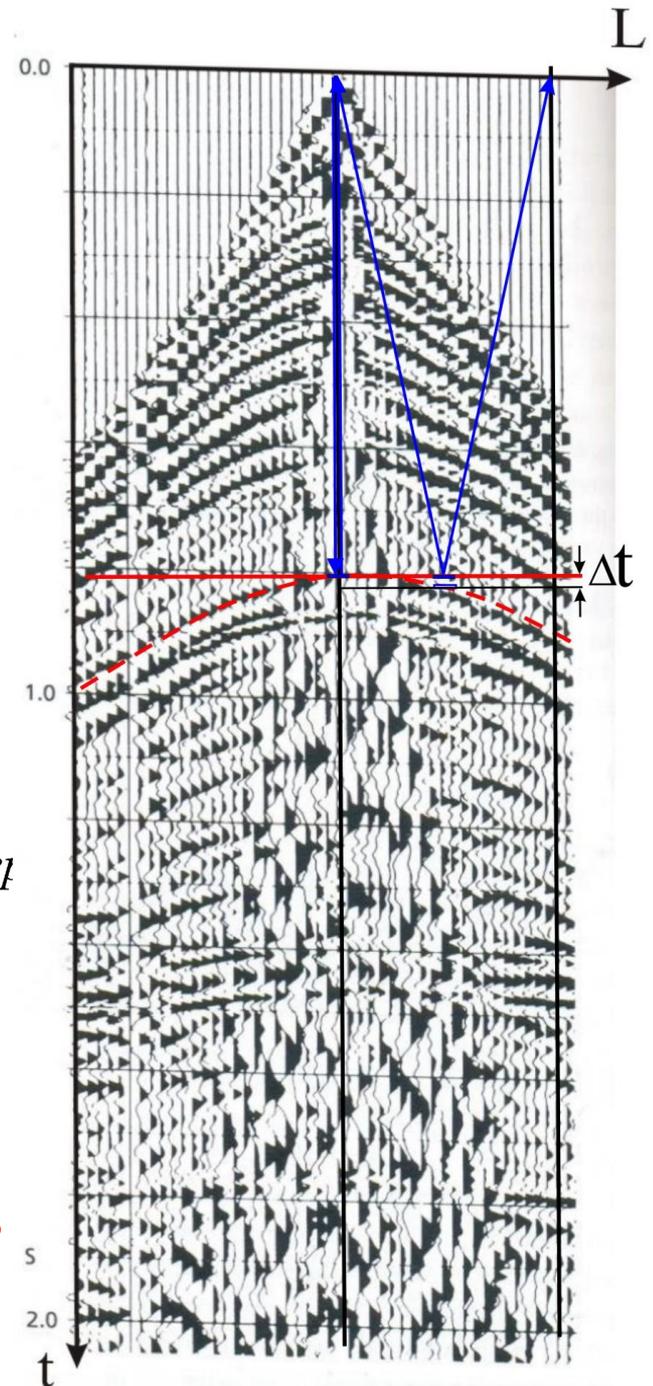
- Временной разрез определяется образом подобранные и преобразованные сейсмограммы, на которых записи отнесены к нулевому времени t_0 , вместо обычного времени регистрации.
- При многоканальной записи для получения временных разрезов сейсмограммы преобразуются следующим образом:

1. В каждый канал вводится т.н. «кинематическая поправка», полученная из ф-лы годографа над двухслойной средой

$$\Delta t_k = \frac{\cos^2 \varphi}{2V_{cp}^2 \cdot t_0} \quad \text{далее рассчитывается нулевое время}$$

$$t_0(x/2) = t(x) - \Delta t_k$$

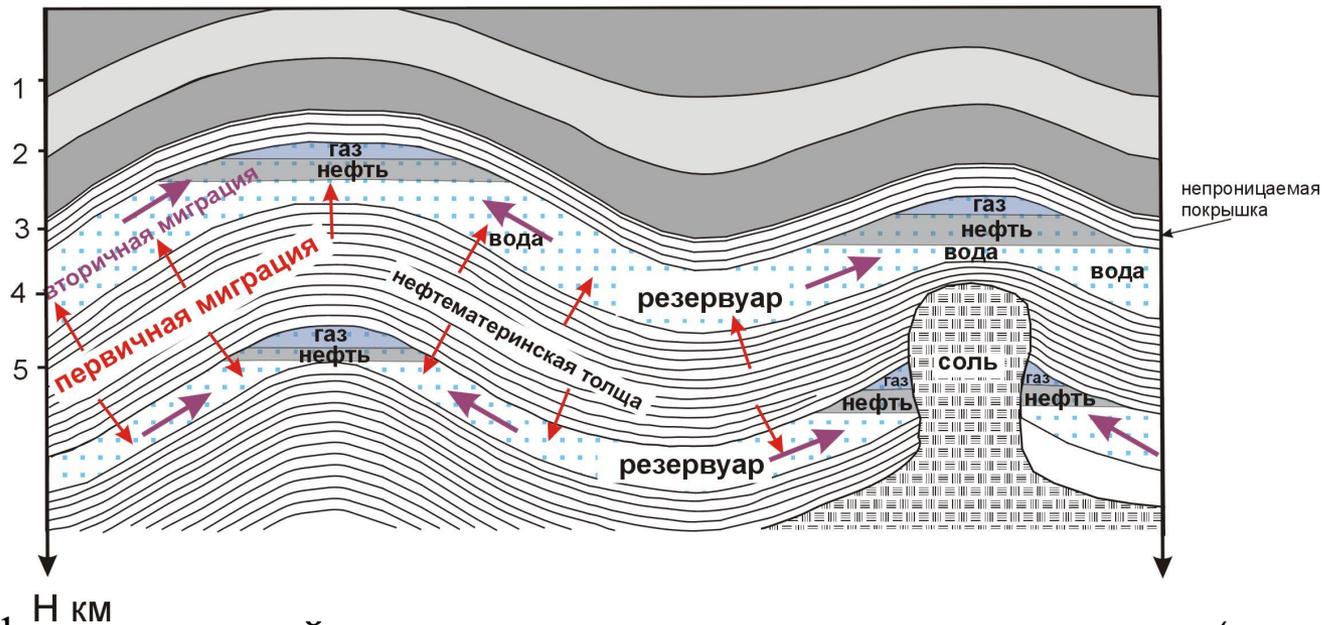
2. Значение $t_0(x/2)$ относится к середине расстояния между пунктами возбуждения и приема. **Т.е. для пункта $x/2$ определяется время, которое могло бы быть измерено, если бы над ней находился пункт возбуждения.**



Сейсморазведка МОВ, МОВ-ОГТ

– главный геофизический метод поисков, разведки и эксплуатации месторождений углеводородов

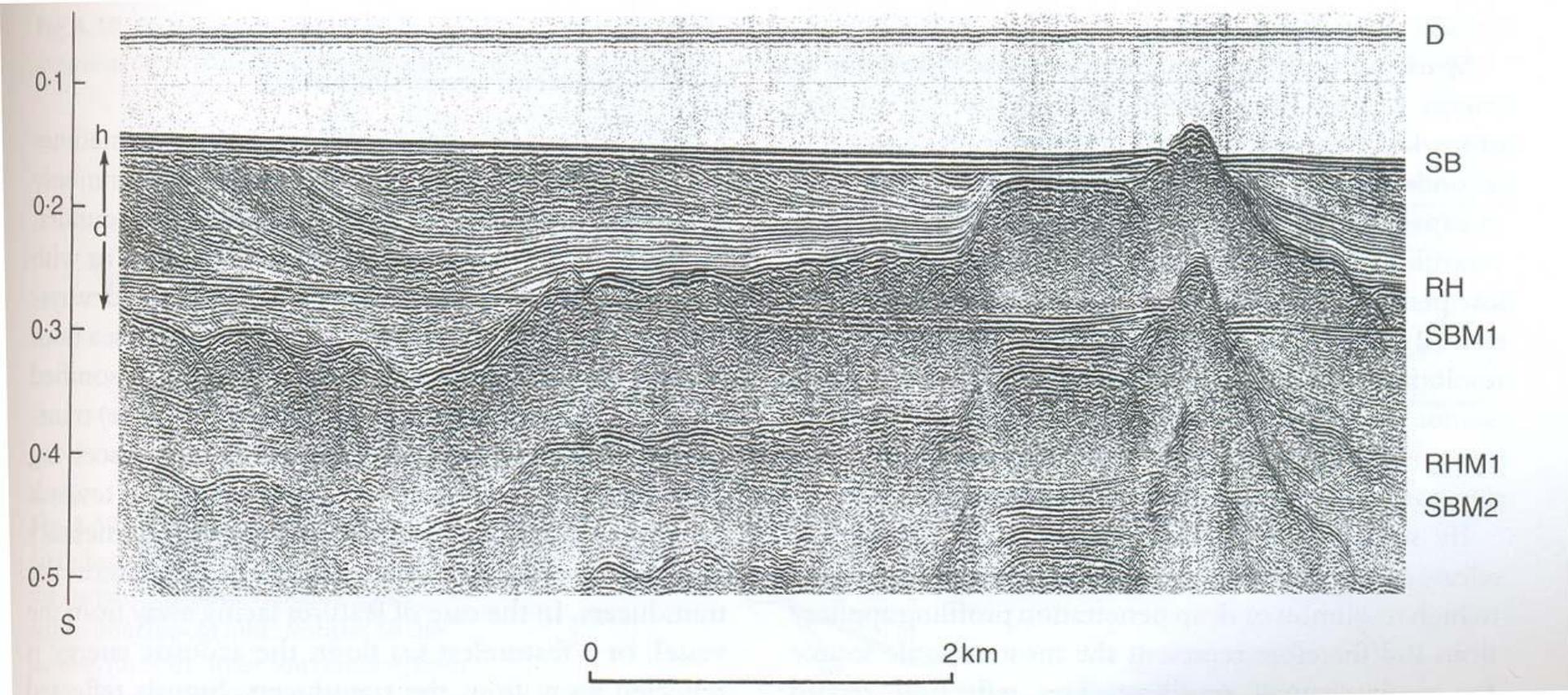
Простейшие модели нефтегазоносных структур



- Нефть из нефтематеринской породы перемещается в пористые породы (резервуар) в результате **первичной миграции**.
- В пределах резервуара нефть перемещается в ловушку – **вторичная миграция**.
- Наиболее распространенный тип ловушек – антиклинали. Зональность залежи УВ – внизу нефть, выше – газ.
- Нефтяные бассейны, приуроченные к одной структуре – **поле**.
Размеры поля – от 5 до 3000 км². Поле размером 25 км² может содержать 136 000 млн. тонн.

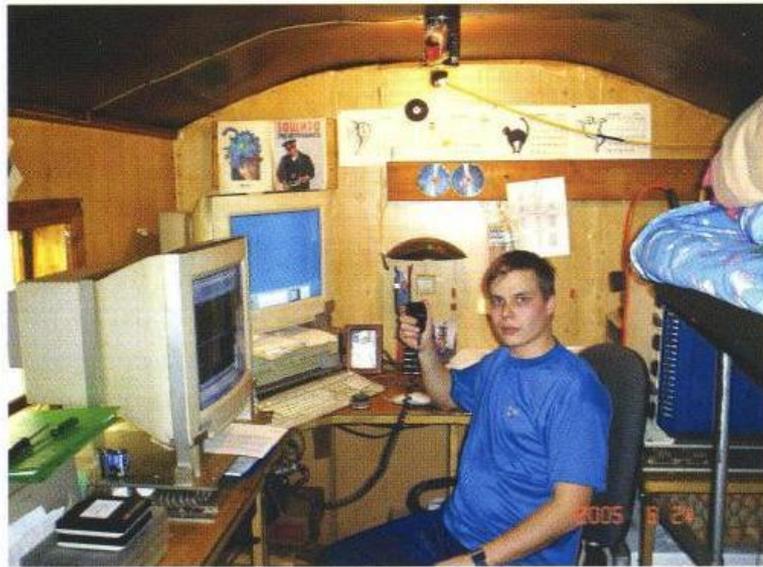
Бассейны - от 0.5 км² до n100 км² с вертикальным размером от n10 м до n100 м. Обычно располагаются на глубинах от 0.5 до 3 км. Более 6 км-редко.

Разрез МОВ-ОГТ осадочного бассейна



- На разрезе уверенно прослеживаются сейсмостратиграфические горизонты, изучение которых позволяет оценить морфологию всего осадочного бассейна, выделить синклинали и антиклинальные структуры, наметить стратиграфические несогласия, разрывные нарушения.

СУХОПУТНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА



РАБОЧЕЕ МЕСТО ОПЕРАТОРА
СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНОЙ СТАНЦИИ,
ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ



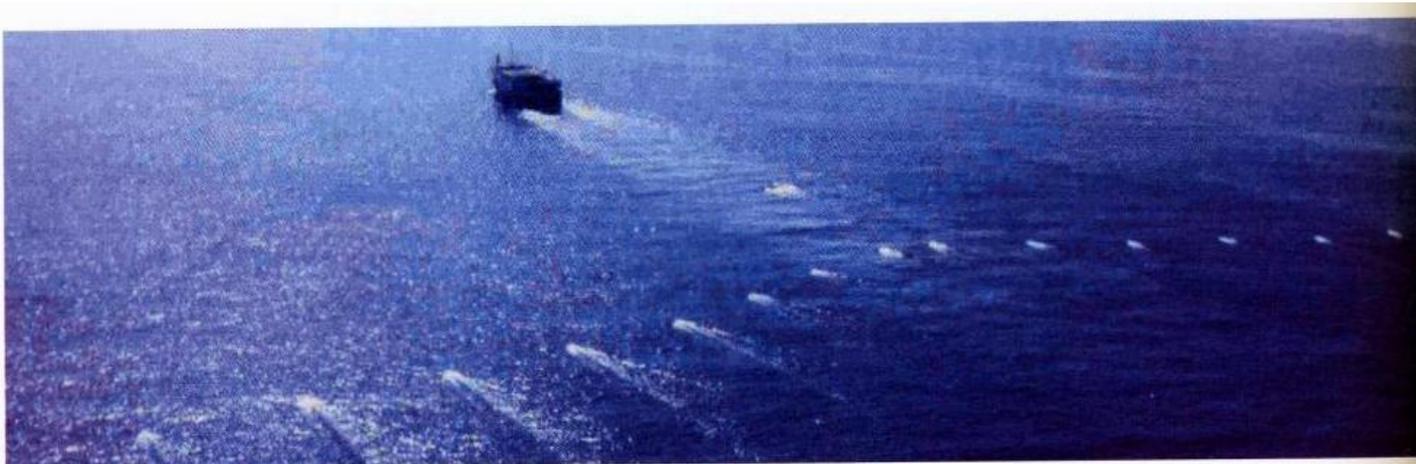
РАЗМОТКА СЕЙСМОКОСЫ

МОРСКАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА



НИС
«АКАДЕМИК
ЛАЗАРЕВ»

2D СЪЕМКИ



БУКСИРОВКА
10
СЕЙСМОКОС,
3D - СЪЕМКА

Применение сейсморазведки

- Когда бассейн обнаружен – КМПВ и МОВ – определение глубины бассейна.
- Главная фаза – **выделение структур ловушек.**
- Раньше использовались профильные работы
В настоящее время 3D с использованием систем параллельных профилей с шагом около 100 м. Ставится только на перспективных площадях.

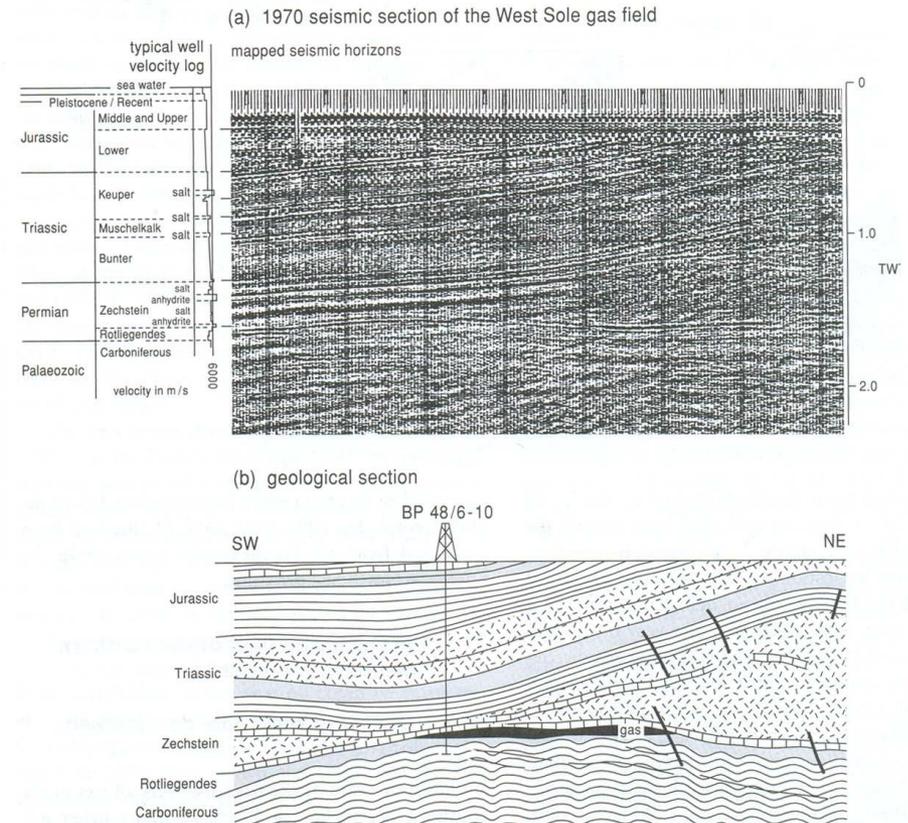


Figure 22.6 Seismic and geological sections of the West Sole gas field 1970.

3D-сейсморазведка МОВ-ОГТ

Трехмерные (3D) модели перспективных площадей выполняются с использованием систем параллельных профилей с шагом около 100 м.

3D сейсмическая модель, представленная на рисунке, показывает распределение в пределах нефтяного поля Forties field (Северное море) пористости пород (от 0 до 30%).

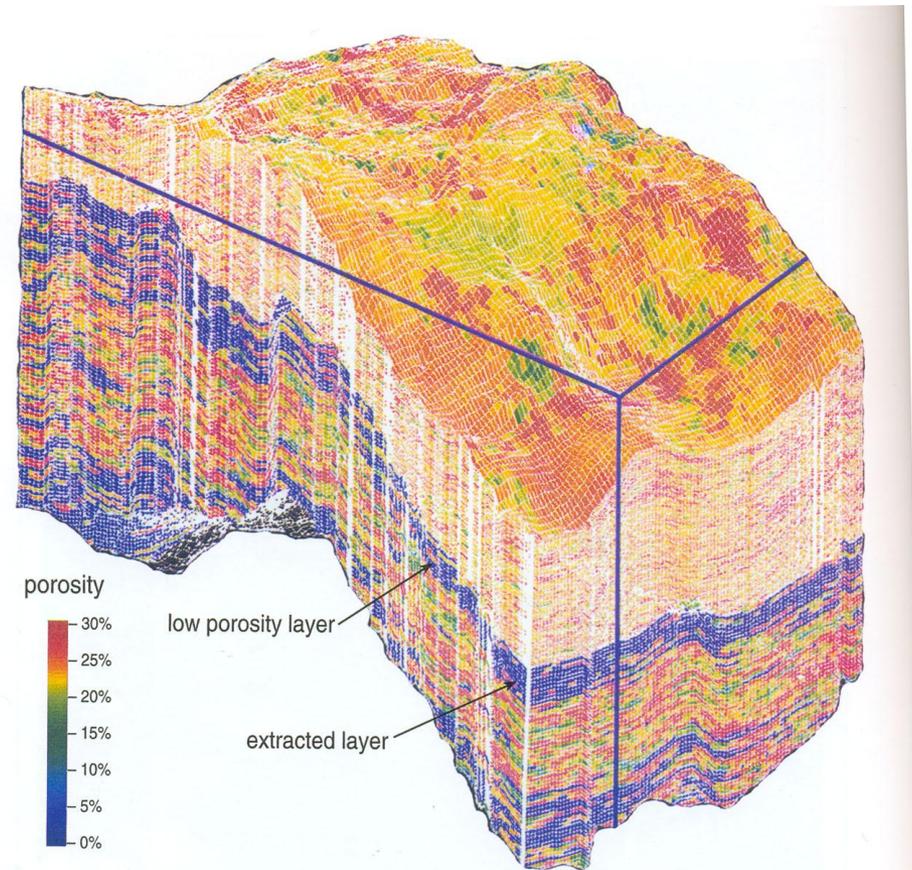


Plate 6. Results of 3D seismic reflection survey. This shows a model of part of the Forties field in the North Sea, obtained by processing 3D seismic-reflection data. Varying porosity is shown by colour, which picks out reflectors. The 'extracted layer' is shown in Plate 7. See Section 7.9.4 and the case study in Section 22.6 for details.

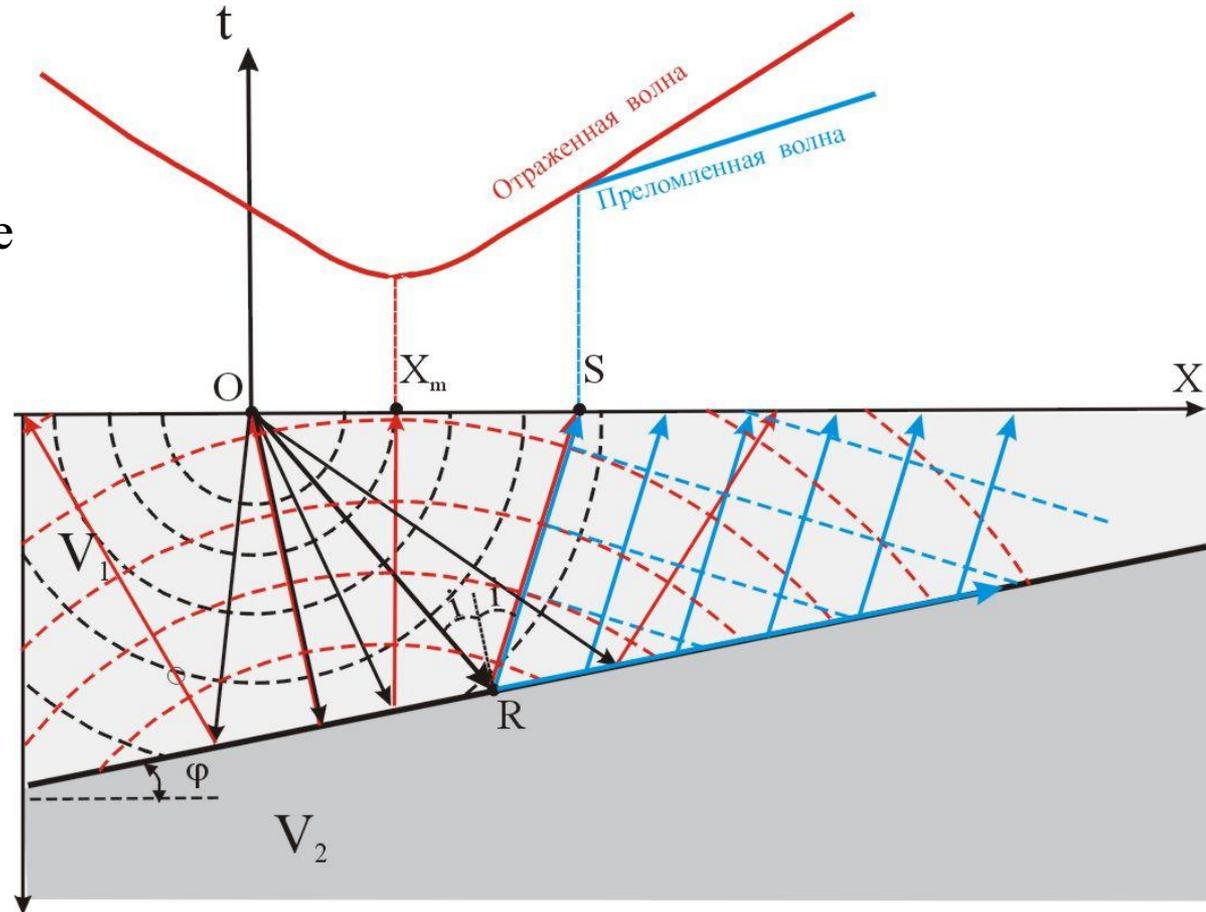
Метод преломленных волн

Годографы отраженных и преломленных волн

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

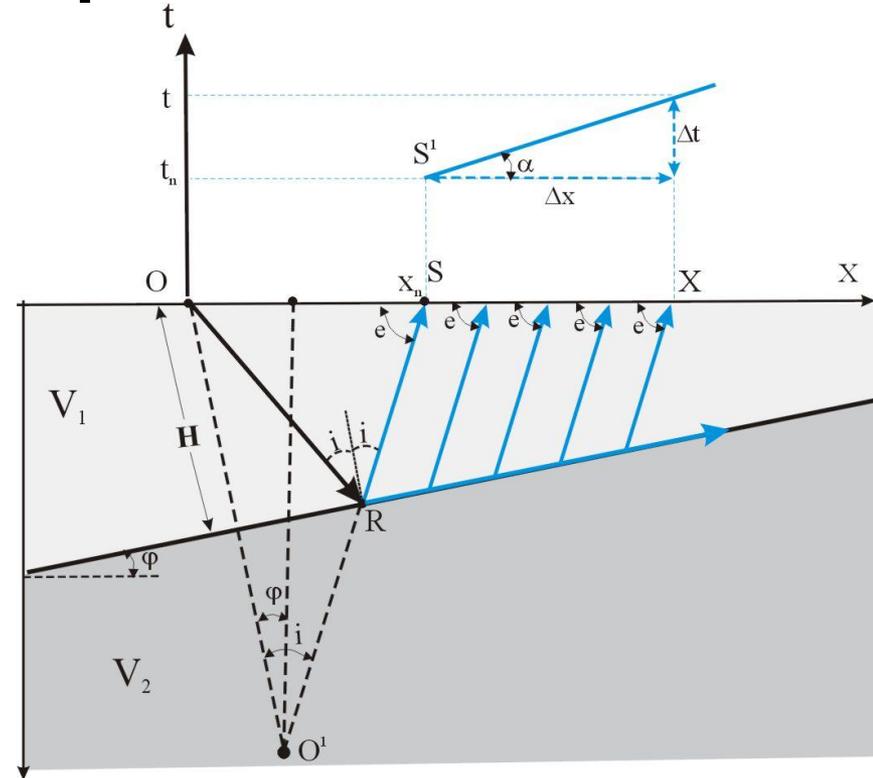
$$\sin i = V_1 / V_2$$

- 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, ε -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 $t_{нВ}$ и $x_{нВ}$. 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.

Интерпретация данных МПВ

- Интерпретация сводится к определению:

H – глубина залег. преломл. границы;

ϕ – угол наклона преломл. границы;

$V_1 = V_2$ граничная скорость в преломляющем слое

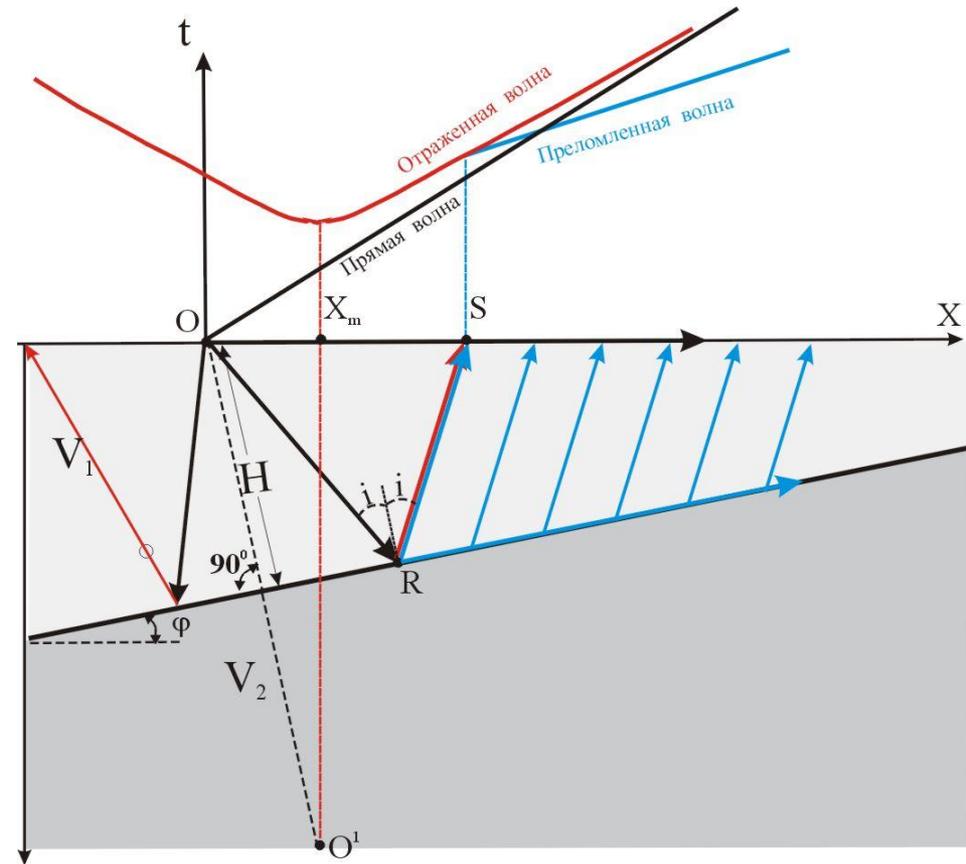
$V_{эф}$ в перекрывающей среде получают по данным сейсмокартатажа или МОВ.

- Надежно интерпретируются только встречные годографы.

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

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

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



Отраженная волна

Преломленная волна

- Пусть имеются два годографа преломленных волн:

$$V_{\text{ср}} \text{ и } V_{\text{г}} = \text{const};$$

$$V_{\text{г}} (V_2) > V_{\text{ср}}$$

- Определим $V_{\text{г}}$ 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);

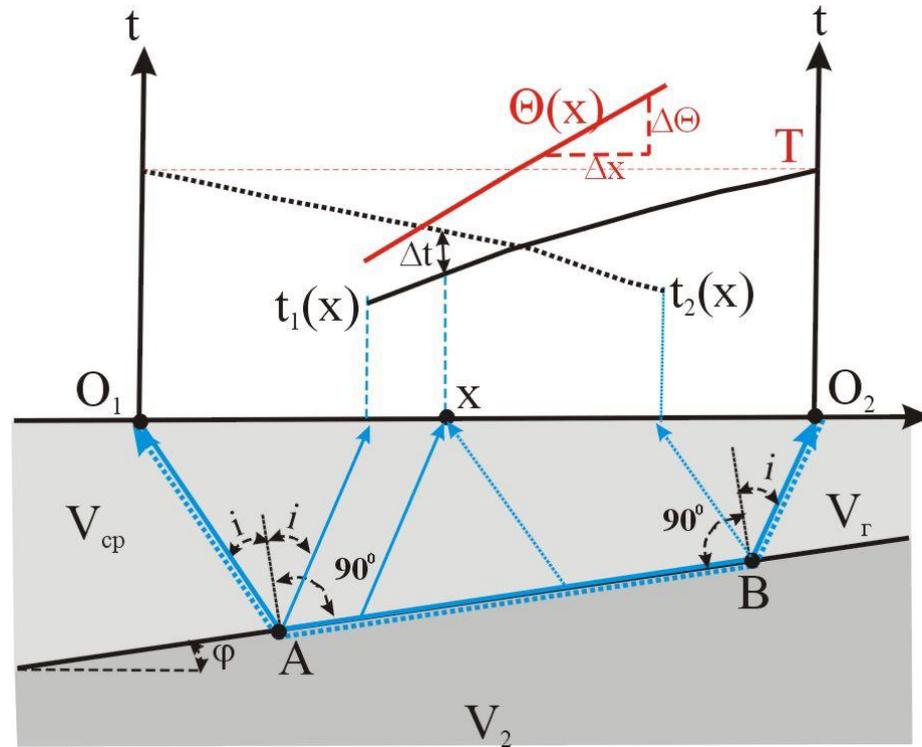
T – время во взаимных точках (т.е. по трассе $(O_1 A B O_2)$ и наоборот.

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

$$\Rightarrow V_{\text{г}} = \frac{2 \cos \varphi}{\Delta \Theta} \cdot \Delta x \Rightarrow$$

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

Определение скорости по встречным годографам



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.

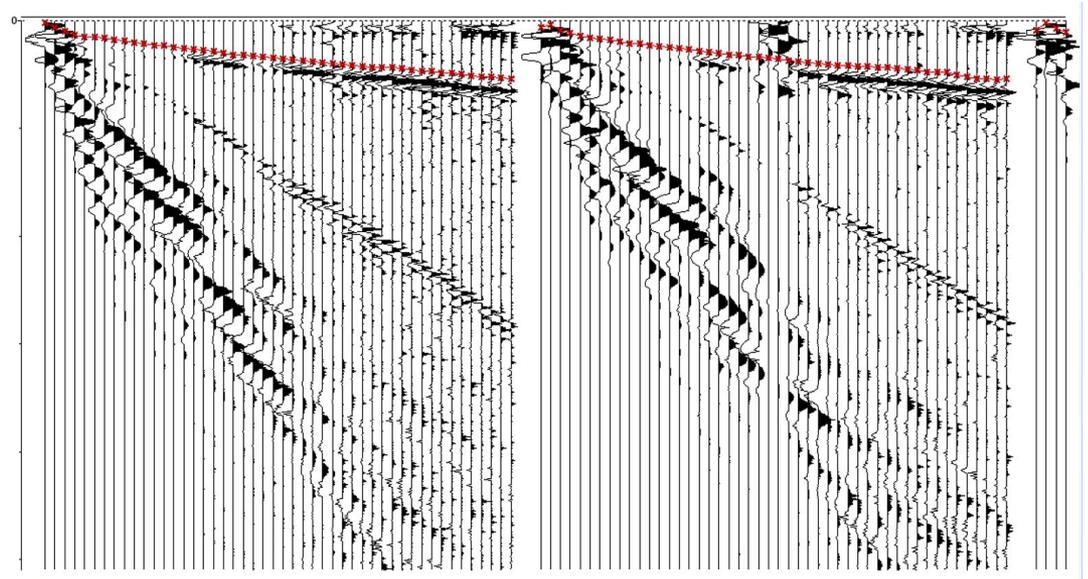
Применение сейсморазведки в инженерной геофизике

- В инженерной геологии применяются профильные сейсмические работы МПВ и МОВ-ОГТ 2D .
- На кафедре ГФХМР для проведения полевых работ используются две 24-х канальные цифровые сеймостанции «Лакколит-Х-М2» производства ООО «Логис», г. Раменское (рис. 3.1). Регистрация осуществляется одновременно двумя сеймостанциями (48 каналов), соединенными при помощи HUB. В качестве источника упругих волн применялась кувалда массой 8 кг с металлической подставкой в форме диска, по которой осуществлялся удар. Синхронизация момента начала записи производилась блоком синхронизации по радиоканалу.



Применение сейсморазведки в инженерной геофизике

- При проведении полевых работ отрабатываются сейсмические профили протяженностью сотни метров. Обработка полевых материалов осуществляется с использованием системы комплексной обработки сейсмических материалов RadExPro 2011



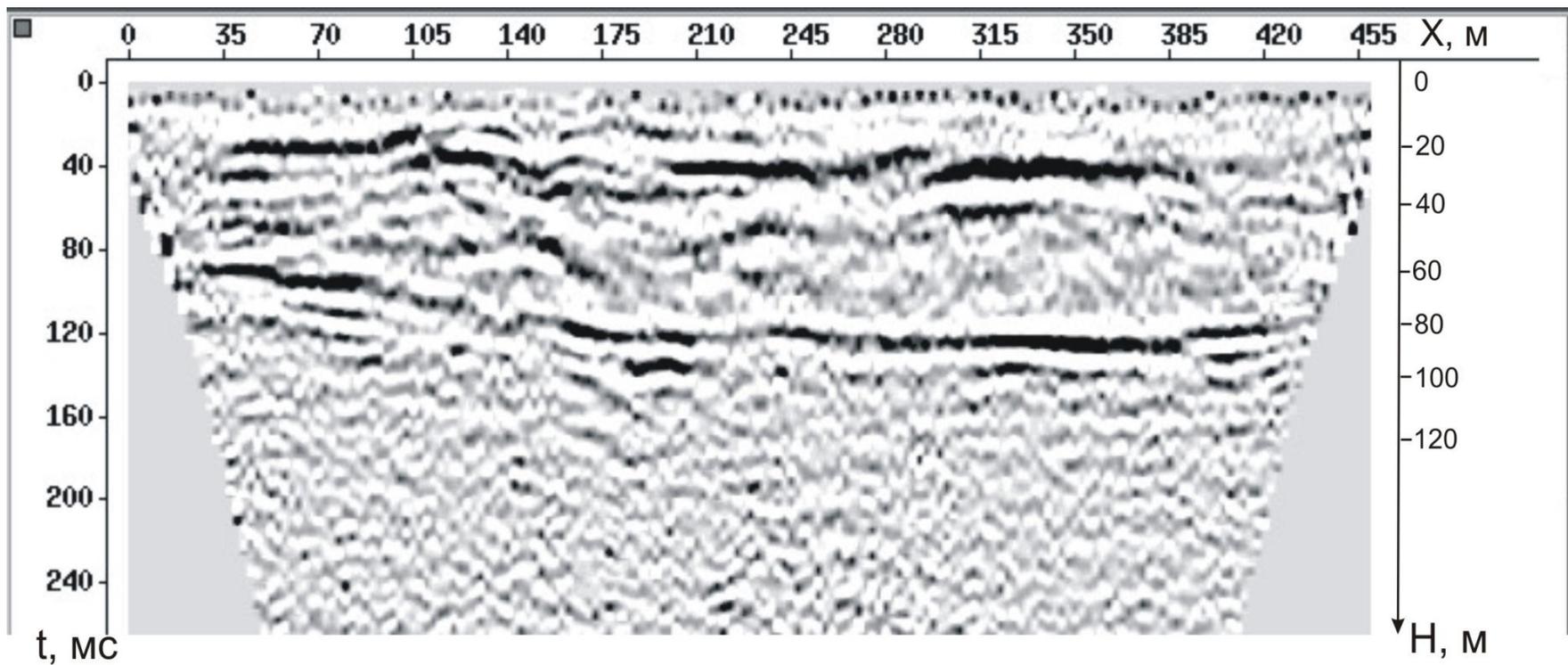
В результате обработки полевых материалов МПВ и МОВ-ОГТ получены:

- временной сейсмический разрез (по данным МОВ-ОГТ);
- разрез скоростей продольных волн (по данным сейсмической томографии);
- положение преломляющих границ и значения граничных скоростей

Применение сейсморазведки в инженерной геофизике



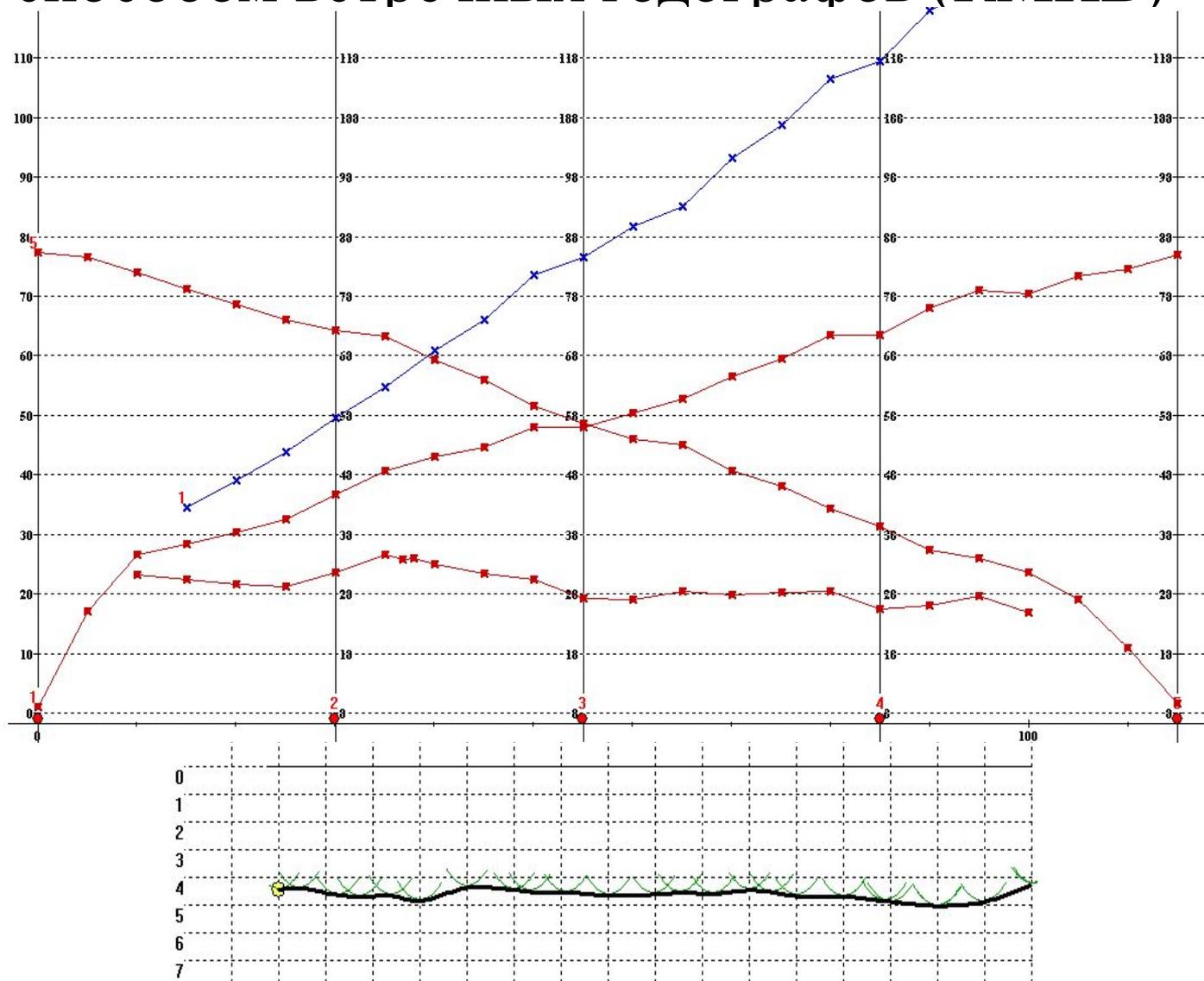
Полевой выезд в район г. Пушкин. В результате проведенных полевых работ был выполнен сейсмический профиль длиной порядка 450 м. После обработки полученных материалов был построен временной сейсмический разрез



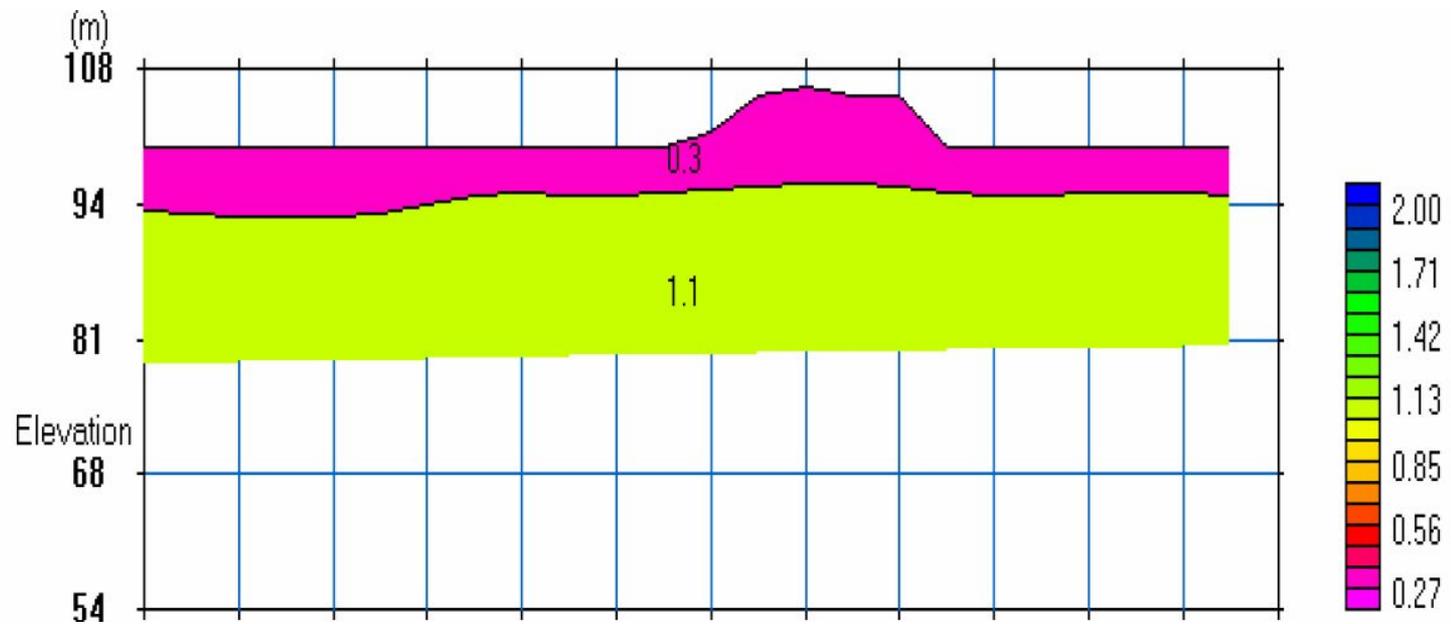
ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

МЕТОДОМ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ
ТОМОГРАФИИ

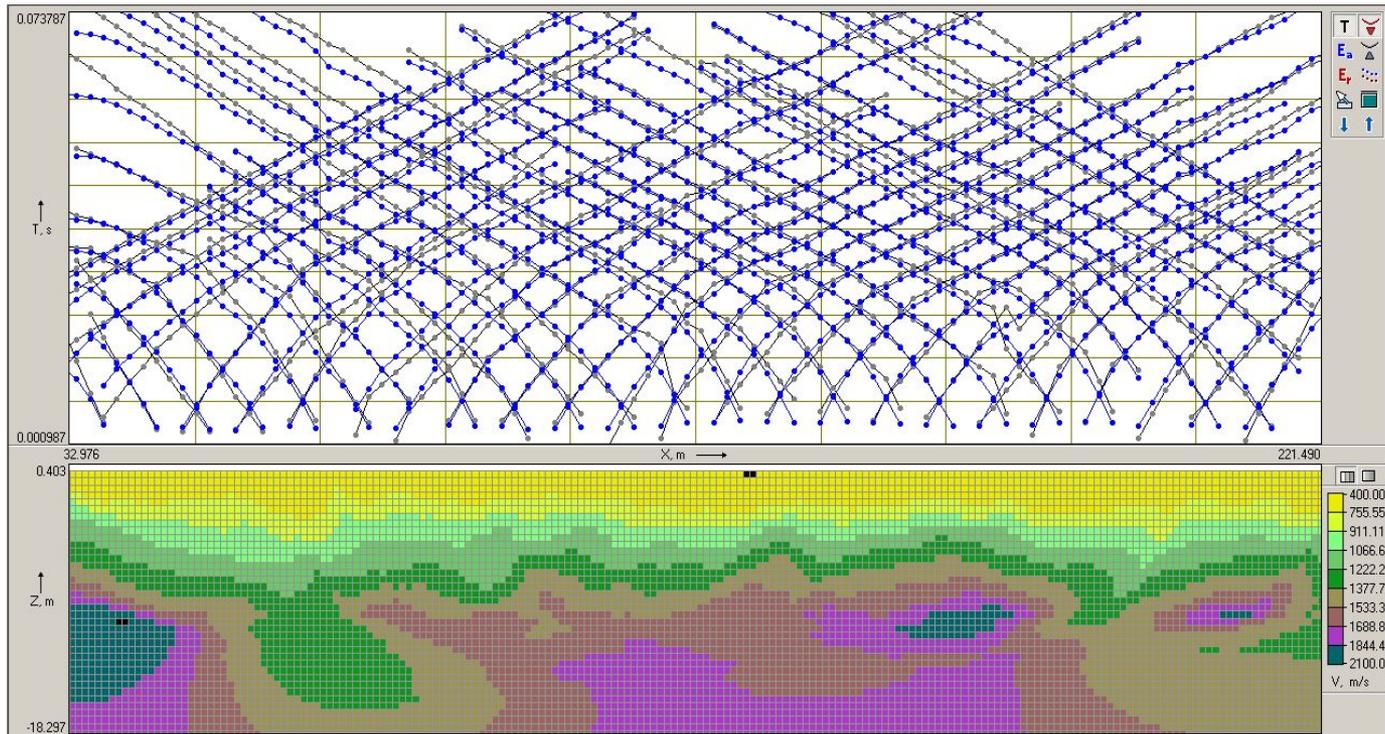
2. Интерпретация данных МПВ способом встречных годографов (КМПВ)



3. Сейсмогеологический разрез по данным КМПВ



Пример сейсмотомографического разреза и сопоставление теоретических и наблюдаемых годографов первых вступлений, рассчитанных в программе XТomo

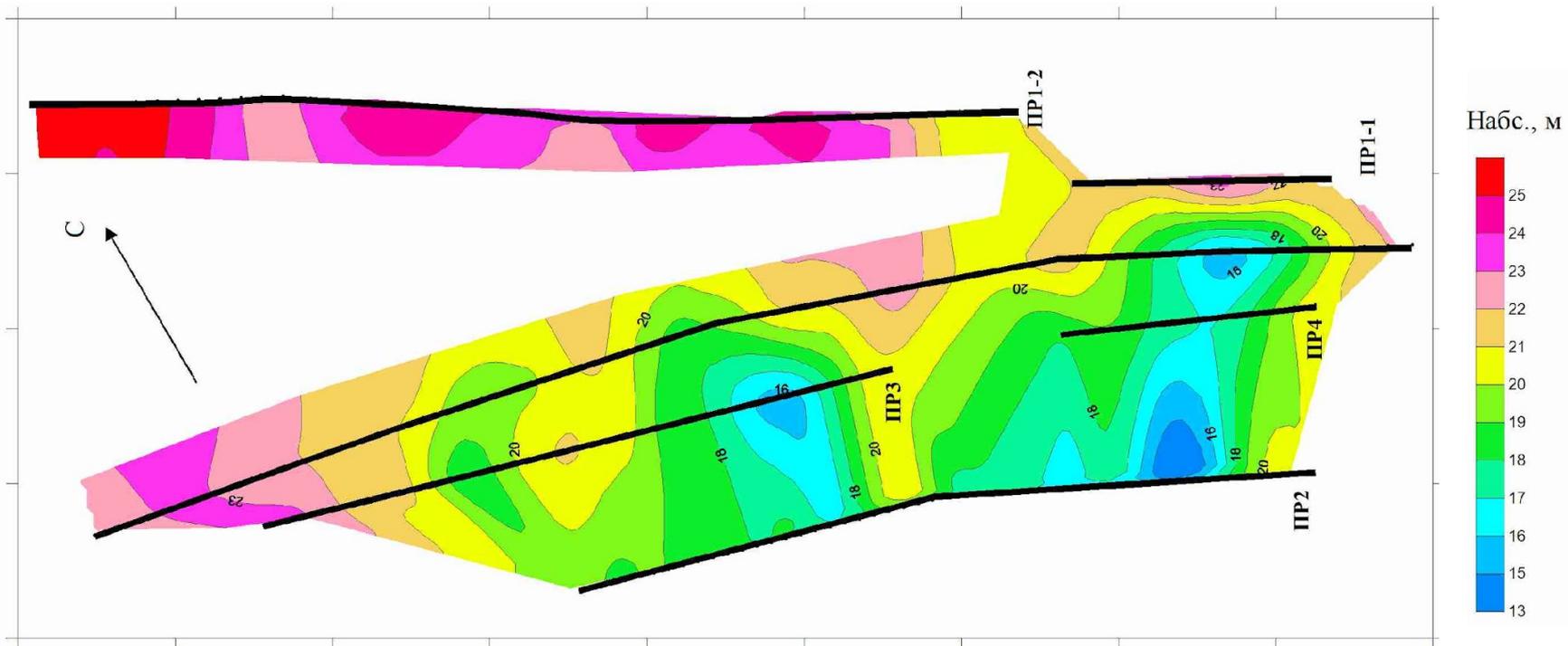


Сейсмотомографические исследования оползневого участка насыпи проектируемой ж/д

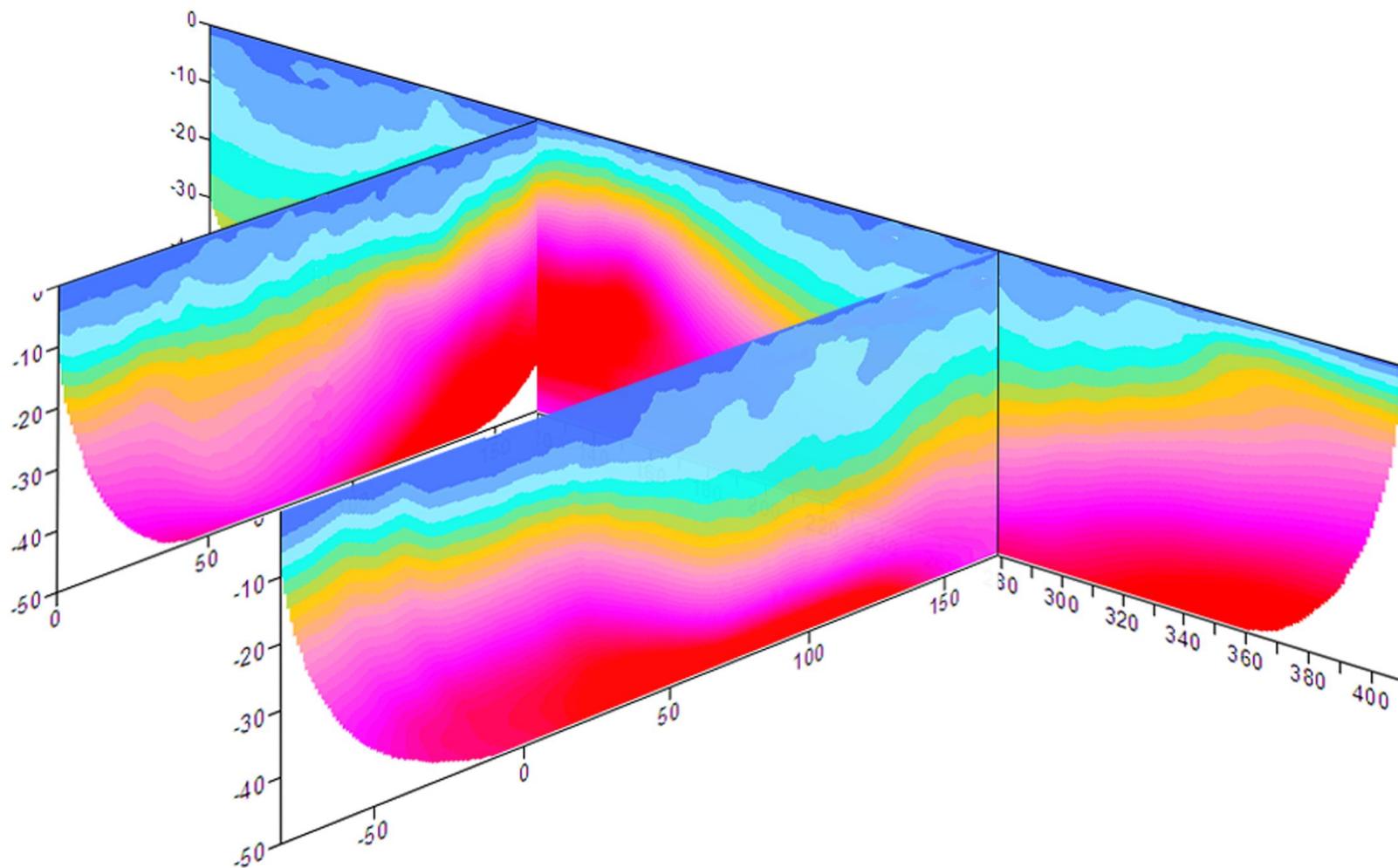


Сейсмотомографические исследования оползневого участка насыпи проектируемой ж/д

Карта абсолютных отметок прогнозной сейсмогеологической границы, соответствующей кровле монолитных скальных пород

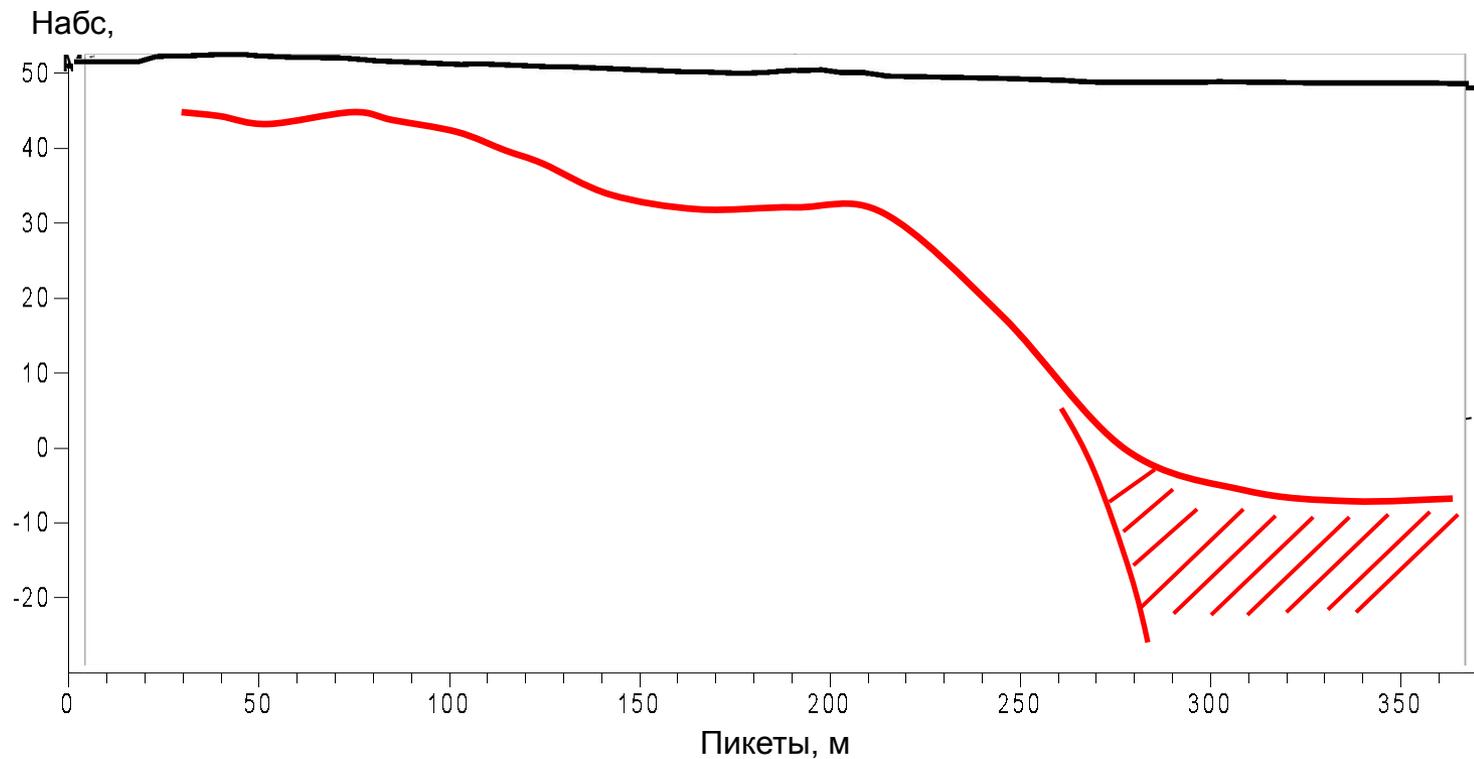


Пример наземной 3D сейсмотомографии



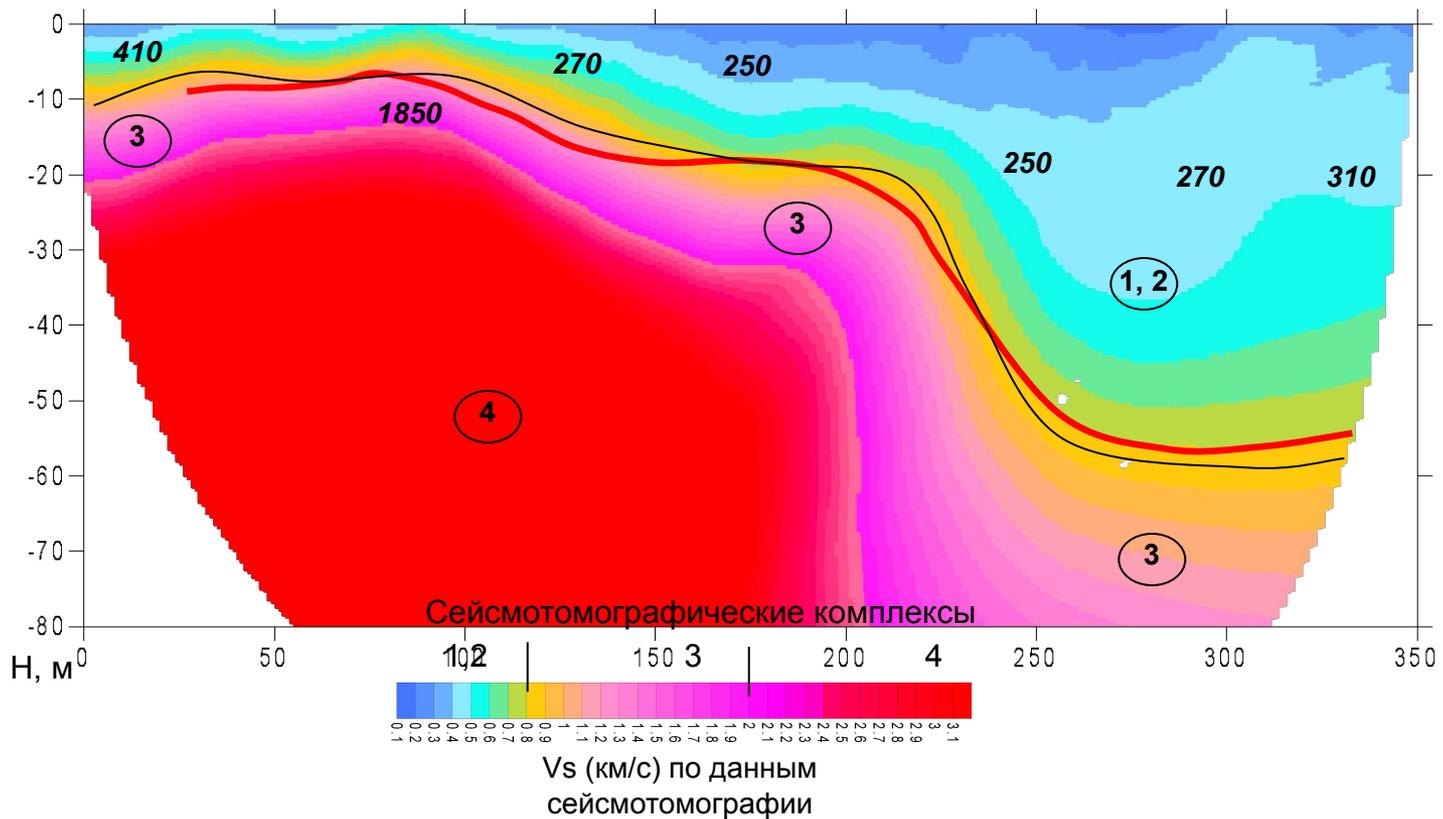
Сопоставление данных метода МОВ ОГТ и сейсмотомографии

Разрез по данным МОВ ОГТ



Сопоставление данных метода МОВ ОГТ и сейсмотомографии (МСТ)

Разрез по данным МСТ



Сопоставление данных метода МОВ ОГТ и сейсмотомографии

Комплексный сейсмогеологический разрез

