

Физика горных пород

Лекция 9 – Акустические свойства горных пород

Лектор: Шульгин Павел Николаевич

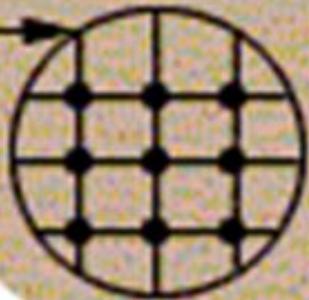
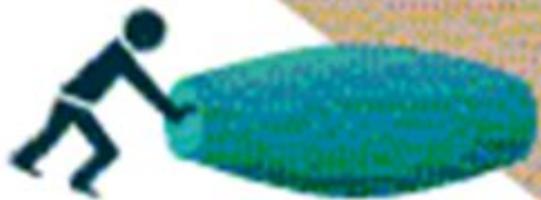
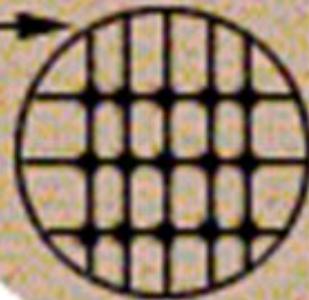
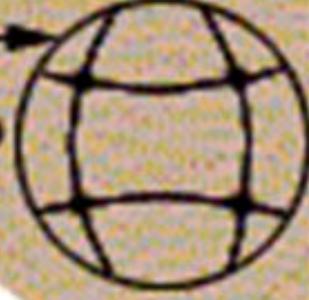
<http://do.dstu.education>

<http://sggs-donstu.ucoz.ru/>

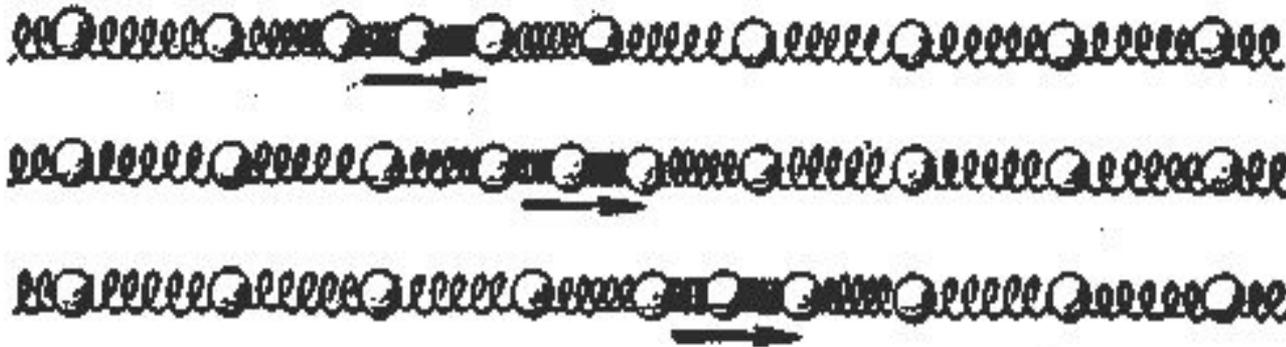
АКУСТИЧЕСКИЕ (ВОЛНОВЫЕ) СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

- Если к ограниченному участку породы приложить **нагрузку**, не превышающую предела упругости, то этот участок испытывает **упругую деформацию**, т.е. смещение частиц по направлению действующей силы.
- Так как частицы **жёстко** связаны друг с другом, деформация одной частицы вызывает смещение других, более удалённых частиц.

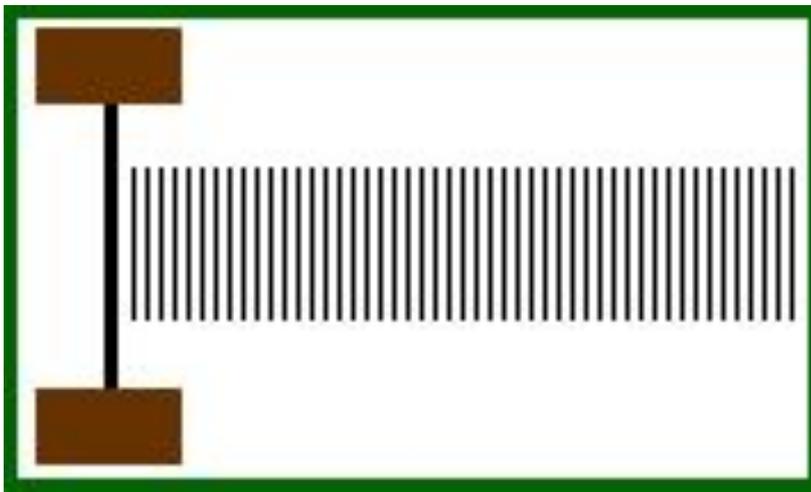
Расположение
частиц вещества

<p>без деформации сила упругости нет</p>		
<p>при сжатии сила упругости стремится распрямить тело</p>		
<p>при растяжении сила упругости стремится сжать тело</p>		

Происходит распространение упругой деформации.



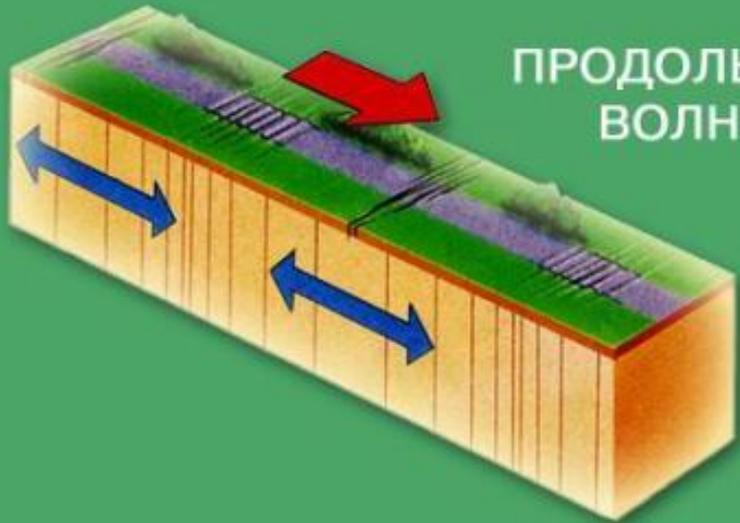
Если на породу воздействовать знакопеременными нагрузками, то в ней начнут распространяться упругие колебания (акустические волны).



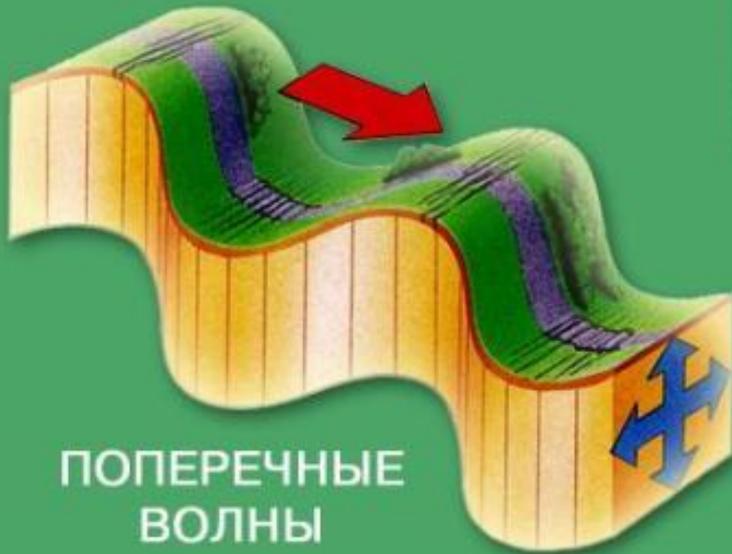
По частоте упругие волны подразделяются на:

1. инфразвуковые - частота колебаний до 20 Гц (человек их не слышит);
2. звуковые - 20-20000 Гц;
3. ультразвуковые более 20000 Гц (человек их не воспринимает);
4. гиперзвуковые - более 10^{10} Гц.

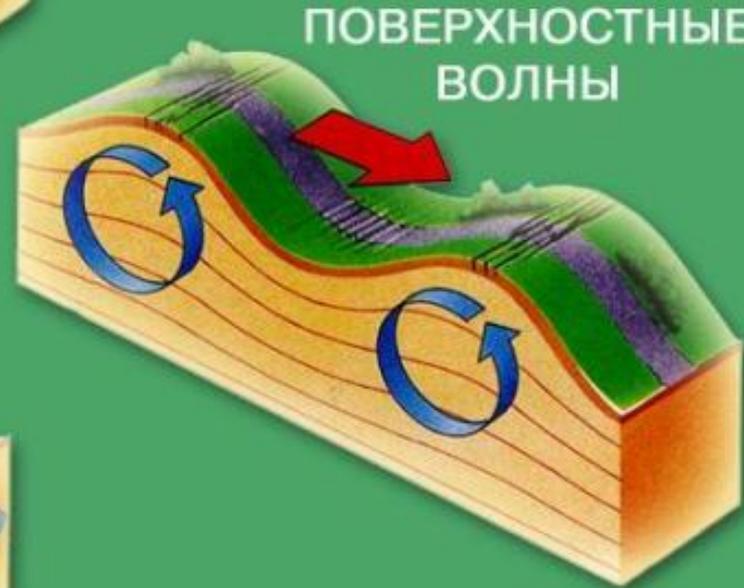
- Волны низкой частоты, распространяющиеся по породам земной коры, получили название - **сейсмические волны.**



ПРОДОЛЬНЫЕ
ВОЛНЫ



ПОПЕРЕЧНЫЕ
ВОЛНЫ



ПОВЕРХНОСТНЫЕ
ВОЛНЫ

- Так как упругие волны представляют собой распространение деформаций в веществе, то в зависимости от вида деформаций могут возникать волны различных типов.

Для возникновения механической волны необходимо:

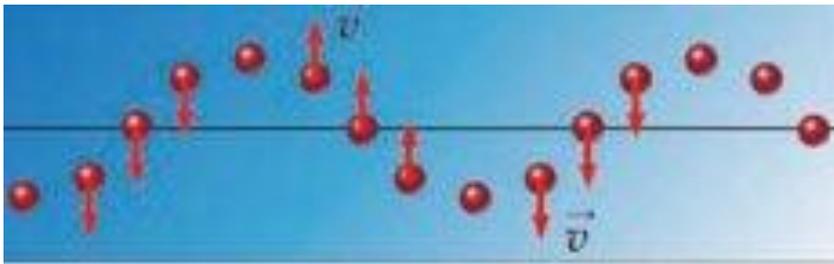
1. Наличие упругой среды
2. Наличие источника колебаний – деформации среды



Волны бывают:



1. Поперечные – в которых колебания происходят перпендикулярно направлению движения волны.



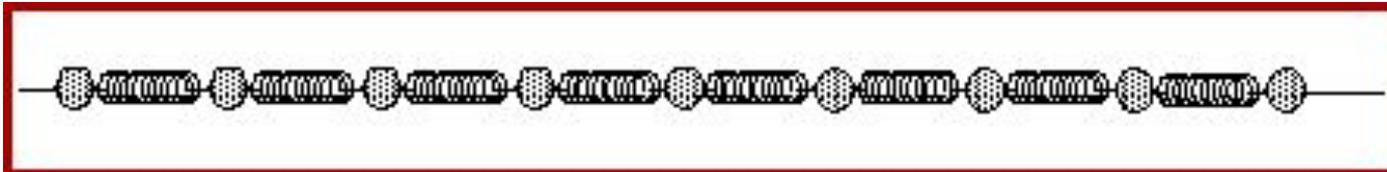
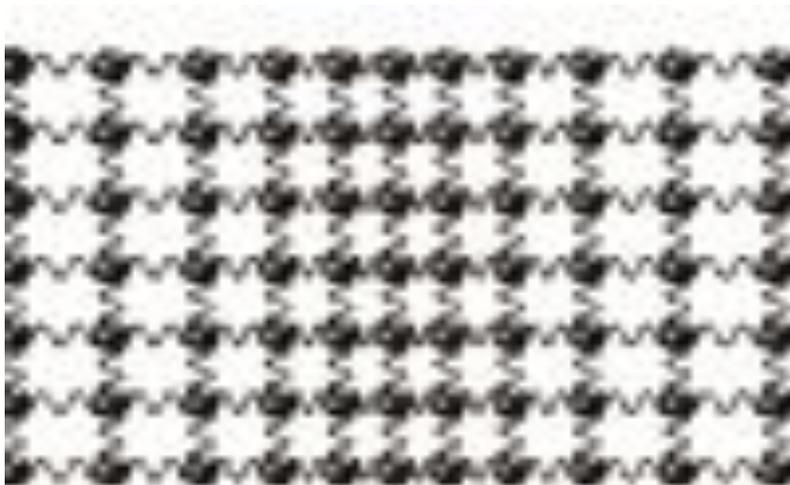
Возникают только в твердых телах.

Волны бывают:

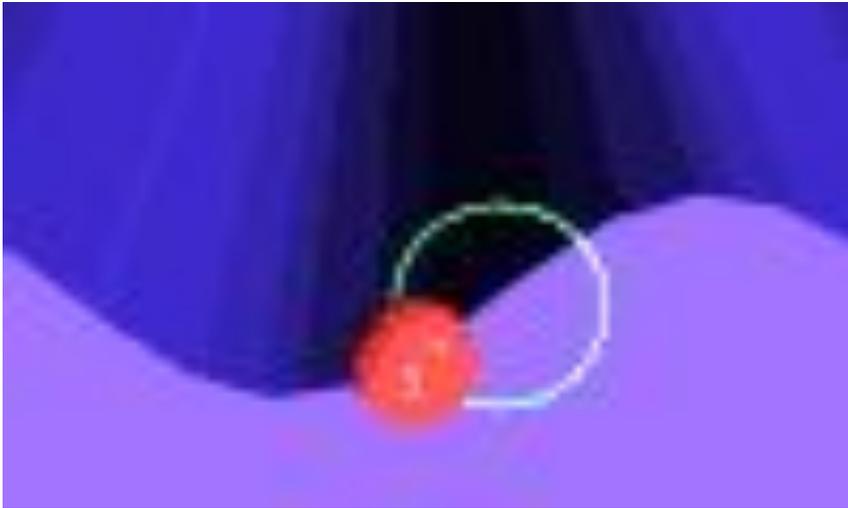
2. Продольные

- в которых колебания происходят вдоль направления распространения волн.

Возникают в любой среде (жидкости, в газах, в тв. телах).



ЭТО ИНТЕРЕСНО !



Волны на поверхности жидкости **не являются** ни продольными, ни поперечными. Если бросить на поверхность воды небольшой мяч, то можно увидеть, что он движется, покачиваясь на волнах, по **круговой траектории**. Таким образом, волна на поверхности жидкости представляет собой результат **сложения** продольного и поперечного движения частиц воды.



- **1. Упругие продольные колебания**

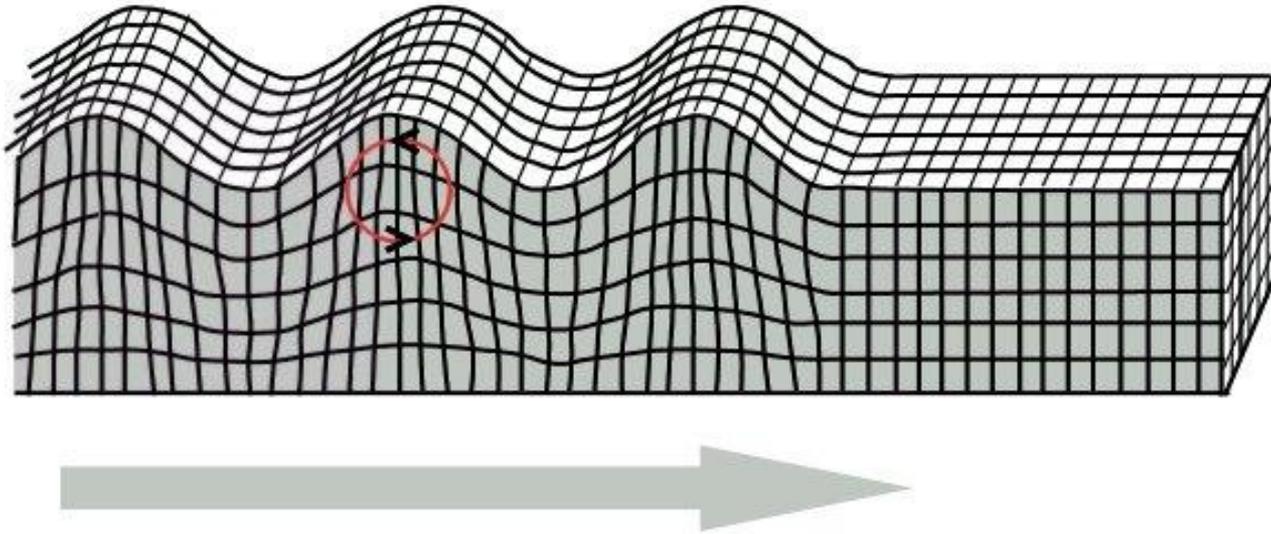
вызываются деформациями сжатия и растяжения в веществе

- **Продольные волны** распространяются в любой среде - газах, жидкостях и твёрдых телах, так как все вещества обладают сопротивлением объёмному сжатию.
- Все звуковые явления связаны с распространением продольных волн.

- 2. Второй тип волн, обусловлен распространением переменных **деформаций сдвига** в среде и получил название **поперечных волн**.
- **Поперечные волны** присущи **только твердым телам**, т. к. в жидкостях и газах отсутствует сопротивление сдвигу.

- 3. Третий тип волн обусловлен тем, что частицы горной породы, находящиеся на поверхности, испытывают особое состояние, так как встречают меньшее сопротивление своим перемещениям в сторону свободной поверхности.
- В результате этого на свободной поверхности породы возникает **плоская поверхностная (рылеевская) волна**.
- **Поверхностные волны** возникают только в **твёрдых телах**.

Rayleigh Wave



- Волны Рэлея распространяются вблизи поверхности твердого тела. Фазовая скорость таких волн направлена параллельно поверхности, Частицы среды в такой волне совершают эллиптическое движение. Амплитуды колебаний затухают при удалении от поверхности.

Характер распространения упругих колебаний в горных породах определяется **акустическими параметрами** пород.

К этим параметрам относятся:

1. **Скорость распространения упругих волн.**
2. **Коэффициенты поглощения, отражения и преломления упругих волн.**
3. **Волновое сопротивление.**

Скорости распространения упругих волн в **неограниченной упругой среде** можно определить по формулам, выведенным из волновых уравнений.

Скорость продольной волны в массиве:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

где ρ - плотность среды,

E - модуль Юнга,

ν - коэффициент Пуассона

Скорость распространения поперечной волны

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

где ρ - плотность среды,

E - модуль Юнга,

ν - коэффициент Пуассона

G - модуль сдвига.

**Скорость поверхностной
волны может быть выражена
через скорость поперечной
волны:**

$$V_L = 0,92 \cdot V_S$$

При этом всегда наблюдается
следующее соотношение
скоростей:

$$V_P > V_S > V_L$$

Скорость распространения упругой продольной волны в тонкой пластине породы

$$V_P^P = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \nu)^2}}$$

Скорость распространения упругой волны в тонком стержне породы

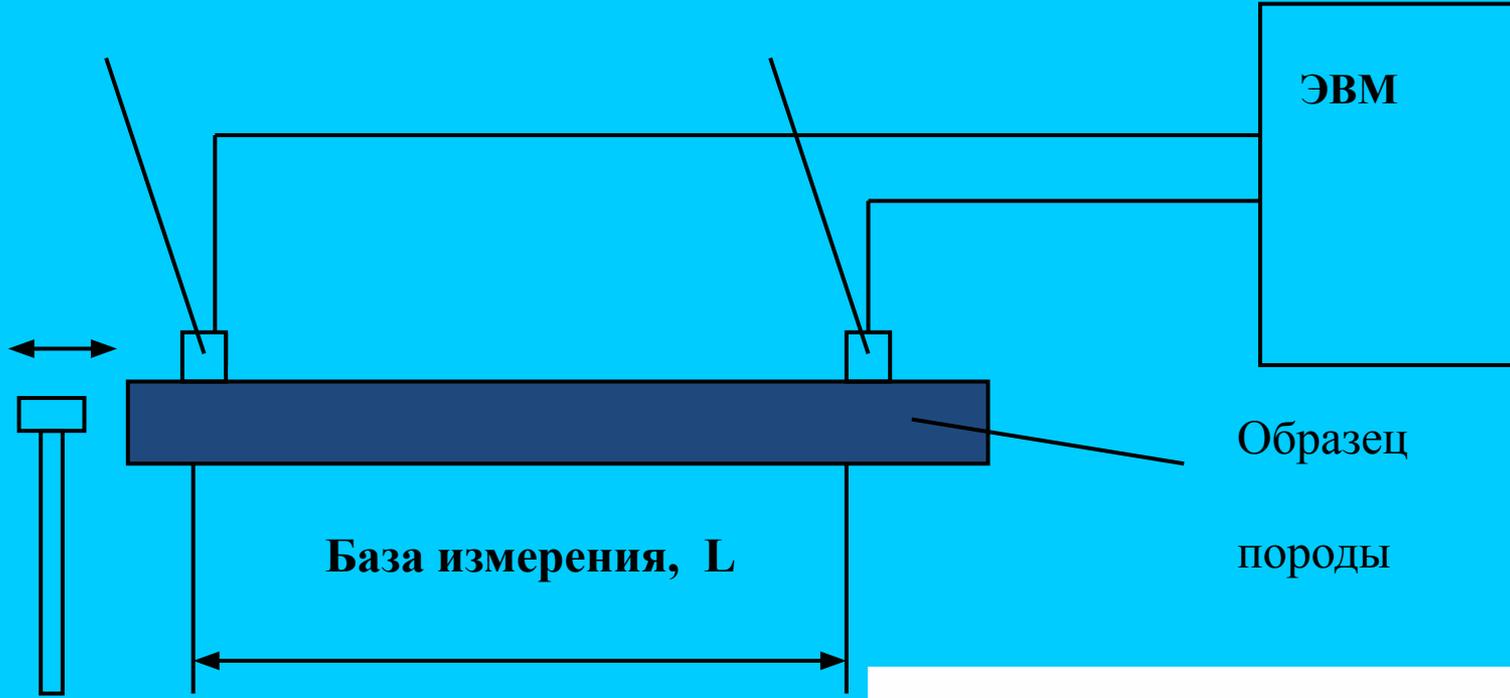
$$V_P^c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- Таким образом, **скорость распространения упругих волн** в горных породах определяется их **упругими свойствами и плотностью.**
- Эта скорость практически не зависит от длины волны, что позволяет использовать для исследований волны **с любыми частотами колебаний.**

Датчик 1

Датчик 2

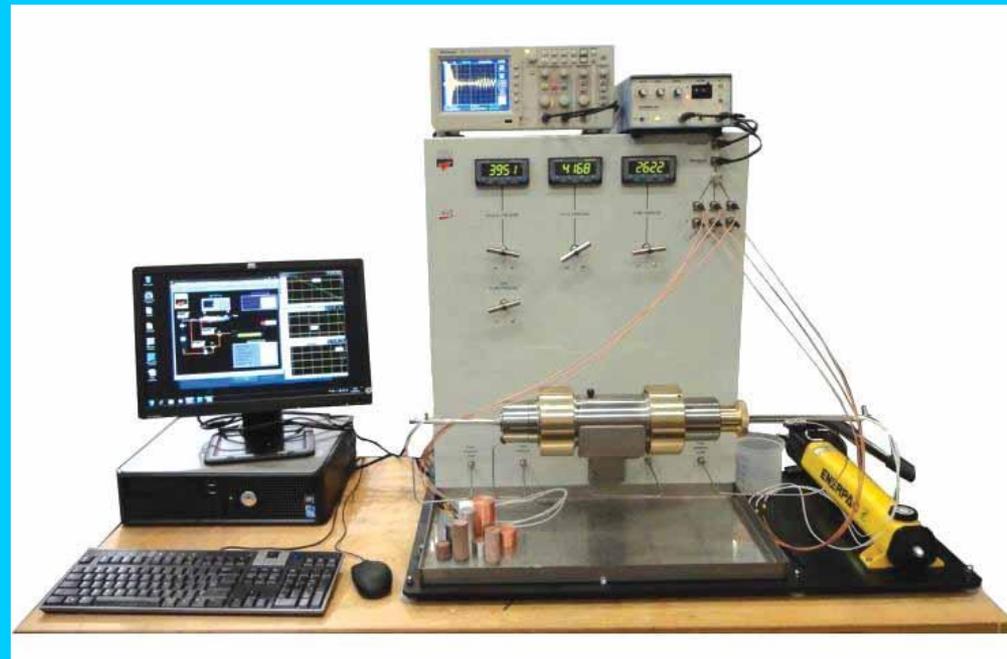
ЭВМ



Образец
породы

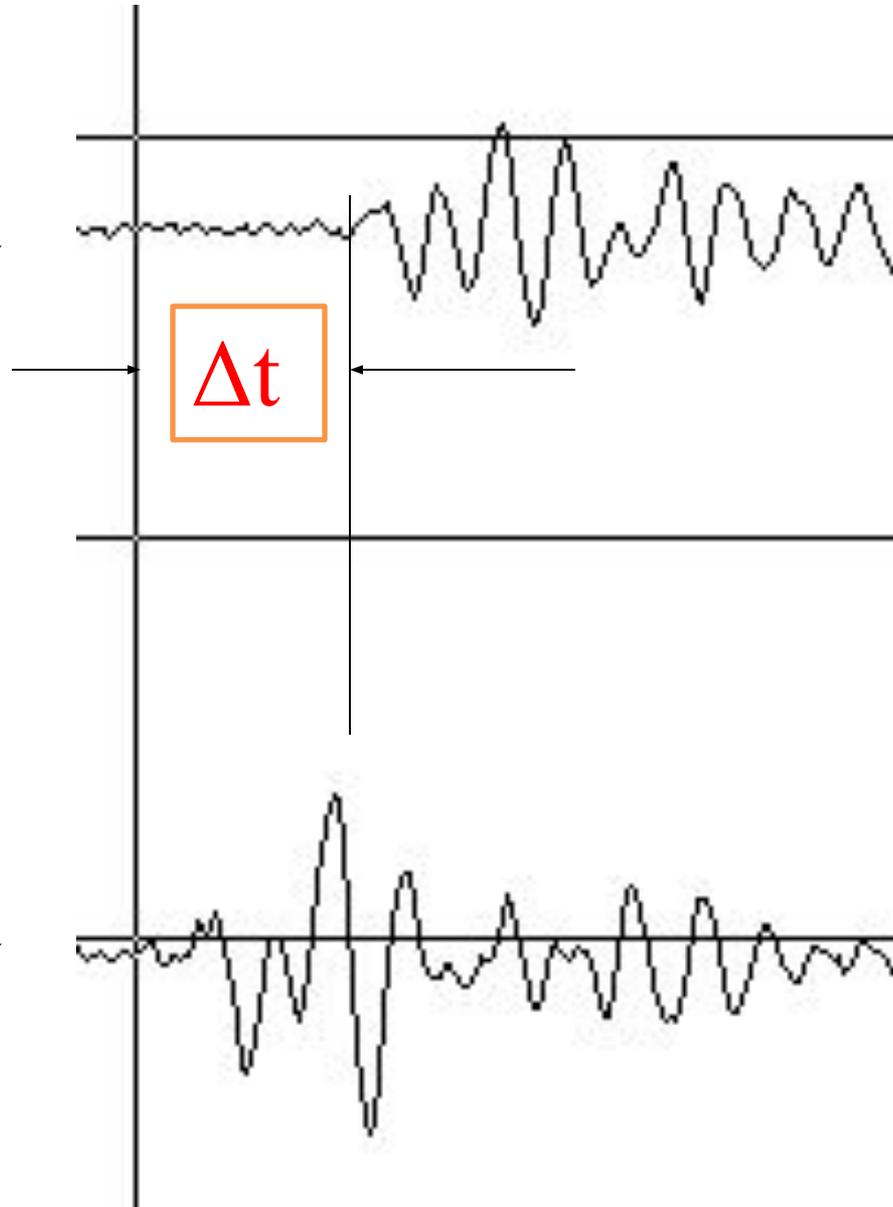
База измерения, L

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$



$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

Сигнал 2 датчика



Сигнал 1 датчика

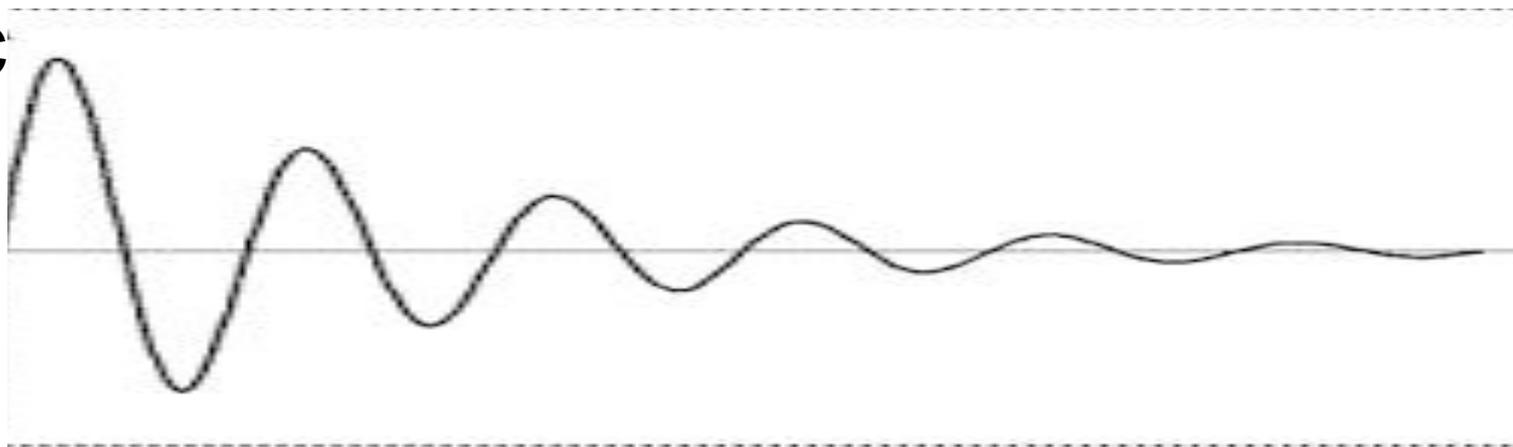
Отношение скорости
продольных волн к скорости
поперечных является функцией
только коэффициента Пуассона
породы

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{2 \cdot \frac{1 - \nu}{1 - 2 \cdot \nu}}$$

- Для кристаллических изверженных и метаморфических пород эта величина изменяется, в большинстве случаев, в довольно узких пределах (от 1,7 до 1,9).
- Более значительные изменения наблюдаются в осадочных породах - от 1,5 до 14.

- Распространение упругих волн в горных породах, также как и в любом веществе, сопровождается постепенным **уменьшением интенсивности** по мере удаления от

ИС



- Существует две основные причины уменьшения **интенсивности**

1. поглощение части энергии упругих колебаний породой и превращение её в тепловую;

2. рассеивание акустической энергии неоднородностями породы (трещинами, порами, включениями и т.д.).

Амплитуда упругих колебаний
U связана с пройденным волной
расстоянием экспоненциально

$$U = U_0 \cdot e^{-\Theta \cdot X}$$

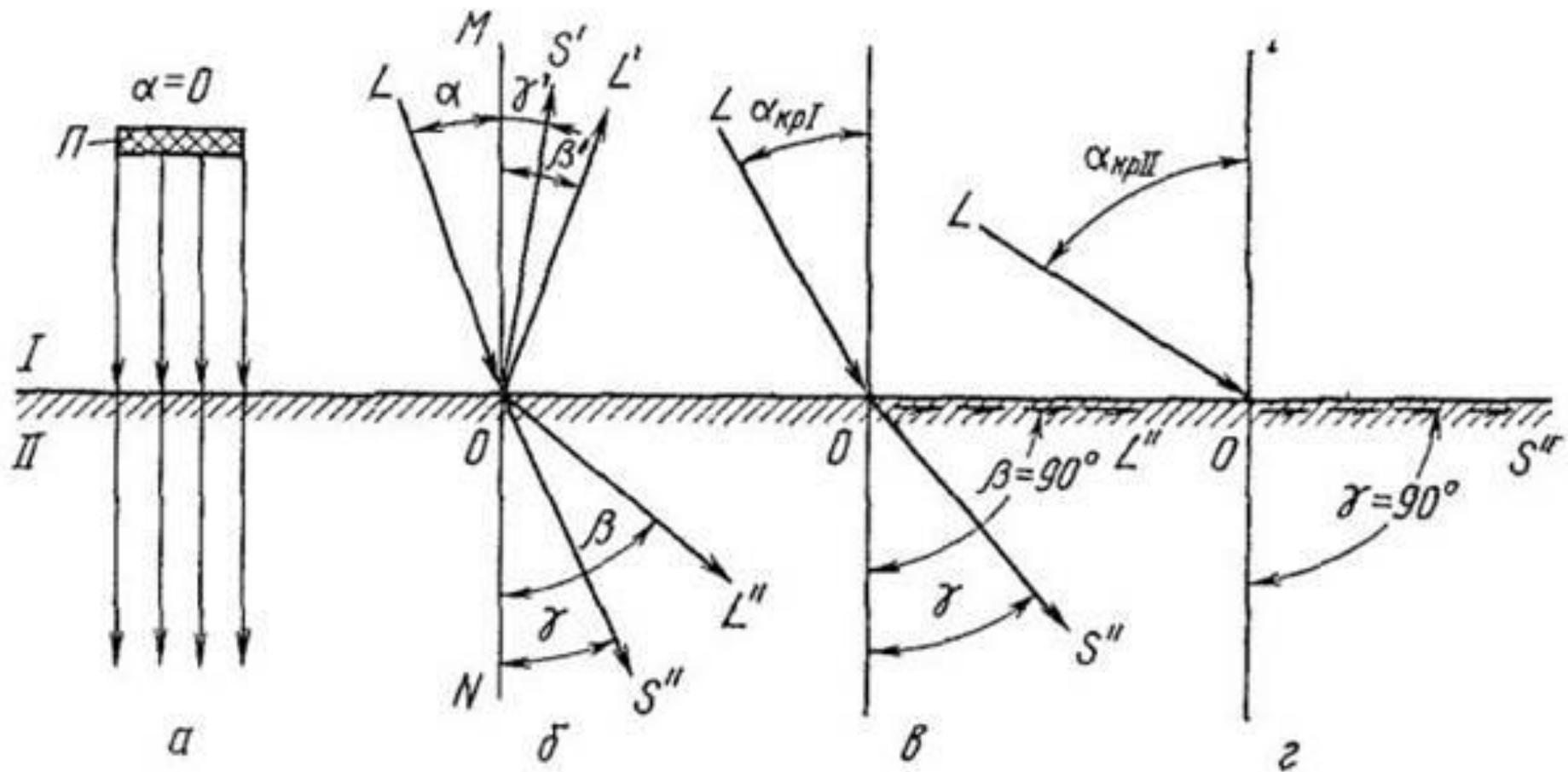
- где: U_0 - начальная амплитуда колебаний;
- Θ - коэффициент поглощения, 1/м;
- X - расстояние, пройденное волной, м.

- **Коэффициент поглощения** упругих колебаний зависит от свойств породы (упругих, тепловых, коэффициента внутреннего трения) и от частоты колебаний.
- Он всегда больше в тех породах, где скорость упругих колебаний меньше.

- В расчётах часто используется произведение плотности породы на скорость распространения упругой волны в ней.
- Этот показатель носит название - **удельное волновое сопротивление** (удельный акустический импеданс)

$$Z = \rho_0 \cdot V$$

- **Волновое сопротивление** пород определяет их способность отражать и преломлять упругие волны.
- Отражение и преломление упругих волн происходит на границе раздела двух сред.



- **Коэффициентом**

отражения называют отношение энергии отражённой волны к энергии падающей волны.

$$K_o = \frac{W_o}{W_n}$$

- **Коэффициент отражения** можно выразить через удельное волновое сопротивление.

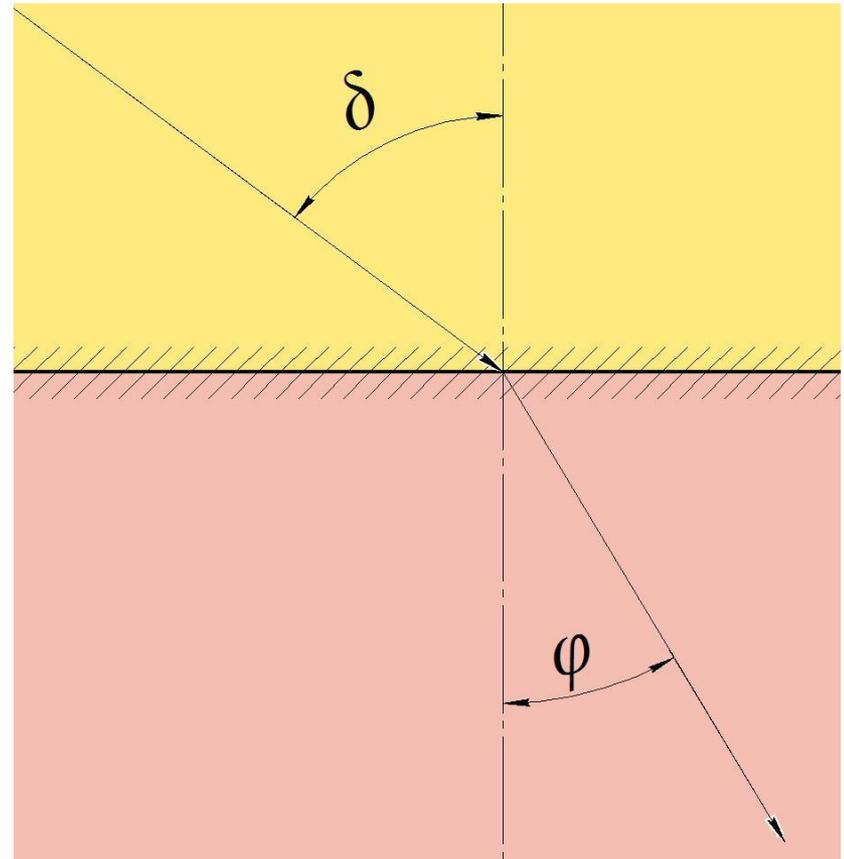
$$K_o = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Чем больше разница в волновых сопротивлениях сред, тем больше энергии отражается.

Коэффициент преломления упругой волны

- Это отношение скоростей упругой волны в первой и второй средах.

$$n = \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} = \frac{V_1}{V_2}$$



Как уже говорилось, все акустические свойства пород определяются их упругими характеристиками

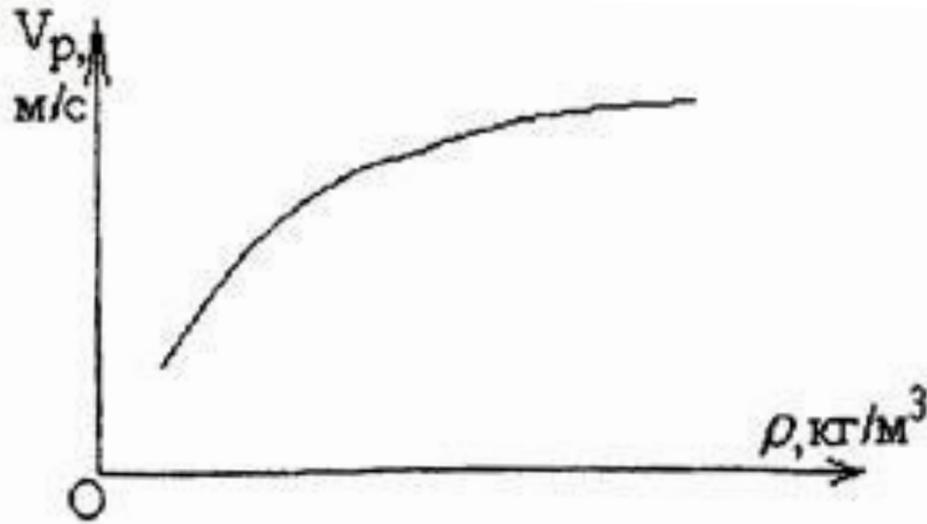
- **Скорость продольных волн** возрастает с увеличением модуля Юнга и коэффициента Пуассона.
- Изменение коэффициента Пуассона от 0,1 до 0,4 увеличивает скорость **продольной волны** примерно на 45%.

- Максимальной скоростью упругих волн обладают темноволновые малопористые породы. Так, например, скорость продольных волн в габбро, перидотитах, базальтах и др. достигает **6000-7000 м/сек.**



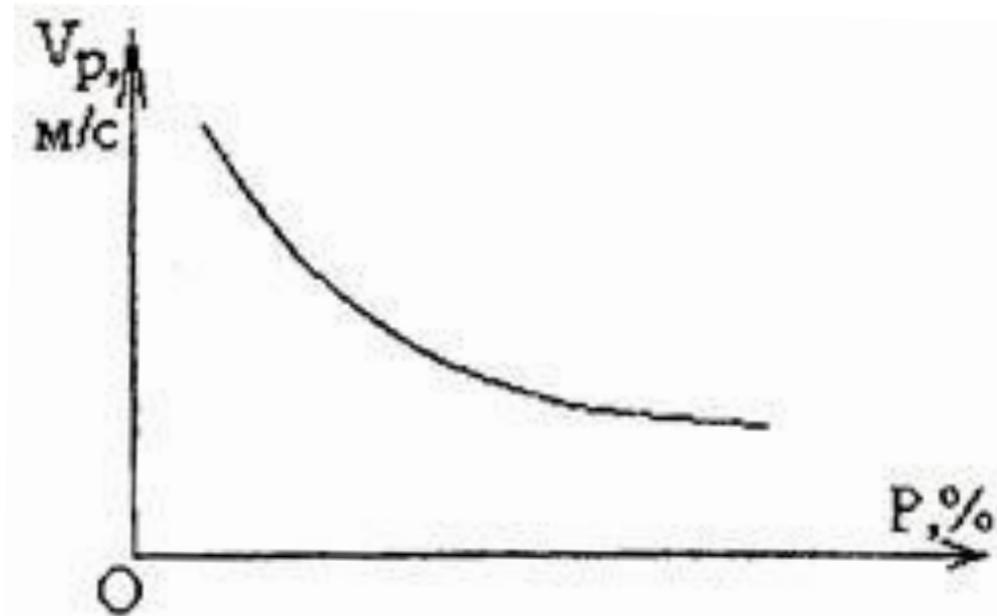
- **Скорость поперечных волн**, с увеличением модуля Юнга возрастает, но уменьшается с ростом коэффициента Пуассона.

- В пористых породах уменьшается модуль Юнга, соответственно уменьшается и скорость упругих волн.
- В слоистых породах наблюдается различная скорость упругих волн **вдоль и поперек слоев.**
- Коэффициент *анизотропии* для большинства осадочных пород составляет 1,1-1,3.

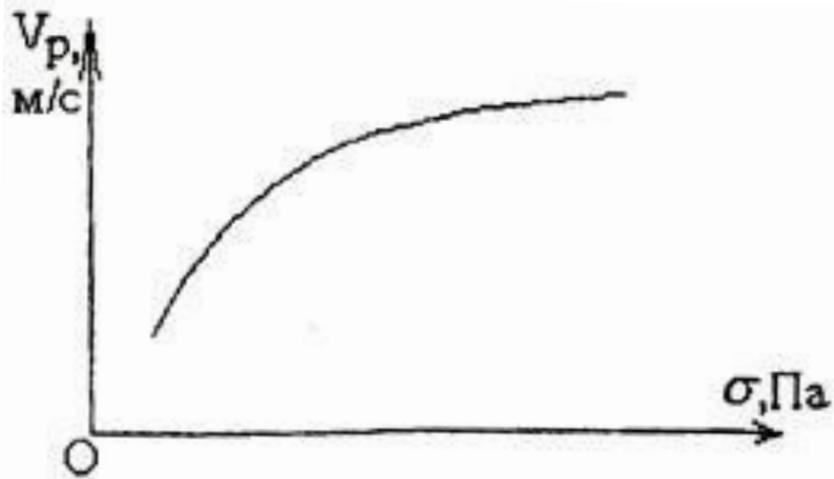


Зависимость скорости
продольной волны
от пористости

Зависимость скорости
продольной волны
от объемной массы



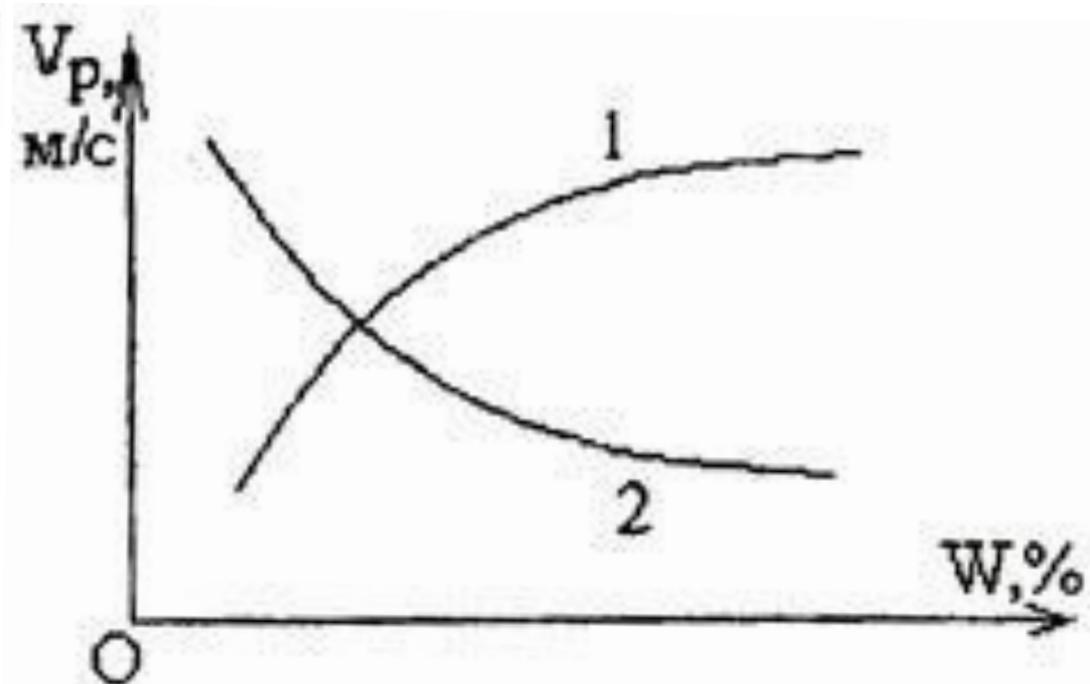
Зависимость скорости продольной волны от напряжений

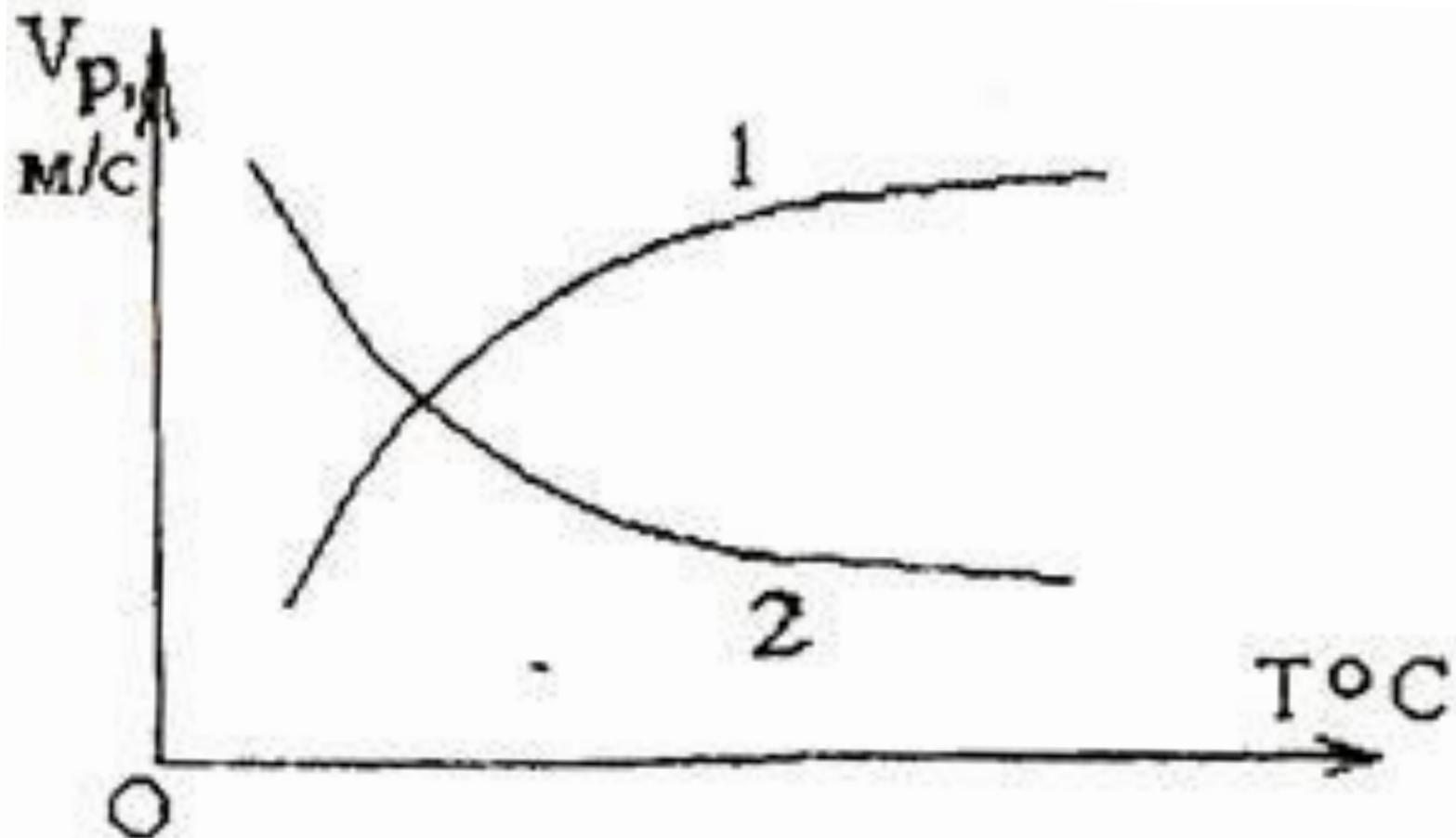


Зависимость скорости продольной волны от влажности:

1 – неразмокаемые породы;

2 – размокаемые породы





Зависимость скорости продольной волны
от температуры:

1 – породы, уплотнение которых происходит при нагревании;

2 – породы, ослабление которых происходит при

- Величина скорости упругих колебаний в породах определяет такие их свойства, как:
 - ***удельное волновое сопротивление Z ,***
 - ***коэффициент поглощения θ ,***
 - ***коэффициенты отражения K ,***
 - ***коэффициенты преломления n .***
- Так с ростом скорости распространения упругих волн возрастают - Z и K , и уменьшаются θ и абсолютное значение n .

- Рыхлые породы практически **не оказывают** сопротивления сдвиговым усилиям, величина которых определяется внутренним трением, поэтому в них, подобно жидкостям, могут распространяться **только продольные волны**.
- В соответствии с этим, чем больше **нарушенность массива пород** (трещиноватость, выветренность и т.д.), чем больше он приближается к рыхлому состоянию, тем **меньше скорость поперечных волн** в нем, и тем больше поглощение этих волн.

- **Увлажнение пористых пород** приводит к изменению скоростей упругих продольных волн в них. Чем выше скорость звука в заполнителе порового пространства, тем больше суммарная скорость в образце породы.
- Однако, даже у максимально насыщенных водой пород, скорость волн будет ниже скорости в малопористых породах.

- **Поперечные волны** могут проходить только через минеральный скелет. Следовательно, скорость поперечной волны остается примерно постоянной для пористых пород любой степени влажности.

- С увеличением **давления** на породу (особенно всестороннего) возрастают упругие параметры пород. Это приводит к увеличению скорости распространения упругих волн.
- Поэтому, одни и те же породы, лежащие на **различных глубинах** и подверженные различному давлению, будут характеризоваться **разной скоростью** прохождения упругих волн.

- Зависимость скорости звука от **уплотнения и нагружения** более резко проявляется в случае пористых и рыхлых пород, так как давление на них оказывает относительно большее уплотняющее действие.
- Так, у песчанистого мергеля с пористостью 25% скорость продольных волн при давлении до 1000 кг/см^2 увеличивается на 50-60%, в то время как у менее пористых пород она увеличивается всего на 20-10%.

- С **повышением температуры** скорость упругих волн изменяется.
- При этом в большинстве случаев скорость продольных волн уменьшается
- а коэффициент поглощения увеличивается.

- С **понижением температуры** у влажных пород, наблюдается скачкообразное возрастание скорости звука при переходе в область отрицательных температур, соответствующую замерзанию воды.
- Скорость звука во льду составляет около 3500 м/сек. Кроме того, в замерзших породах происходит резкое возрастание скоростей поперечных волн.

Использование волновых свойств пород в горном деле

Для исследований свойств горных пород и промышленного использования акустических явлений в них необходимо возбудить упругие колебания.

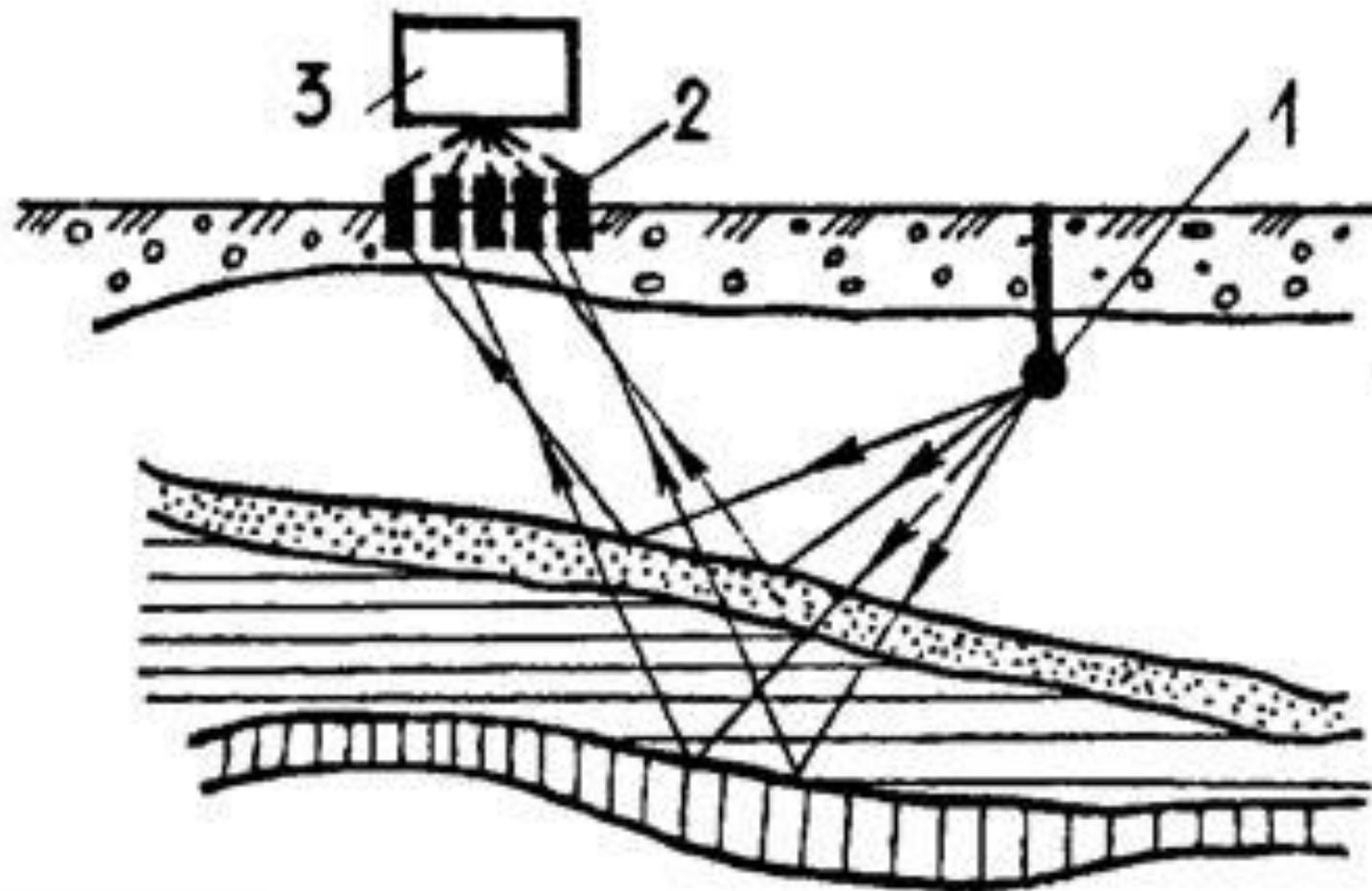
Это обеспечивается:

- **взрывом,**
- **ударом,**
- **механическим вибратором,**
- **пьезоэлектрическим или магнитострикционным датчиками.**

- **Взрывной способ** применяется для получения сейсмических колебаний,
- **механический** - в основном для получения колебаний инфра- и звуковых частот,
- **пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи** - для получения ультразвуковых колебаний.

- В горном деле широко используются акустические методы для получения информации о горных породах и массивах.
- Эти методы основаны на зависимости между различными акустическими свойствами пород и прочими их физическими свойствами:
 - минеральным составом;
 - строением;
 - внешним воздействием (напряженным состоянием).

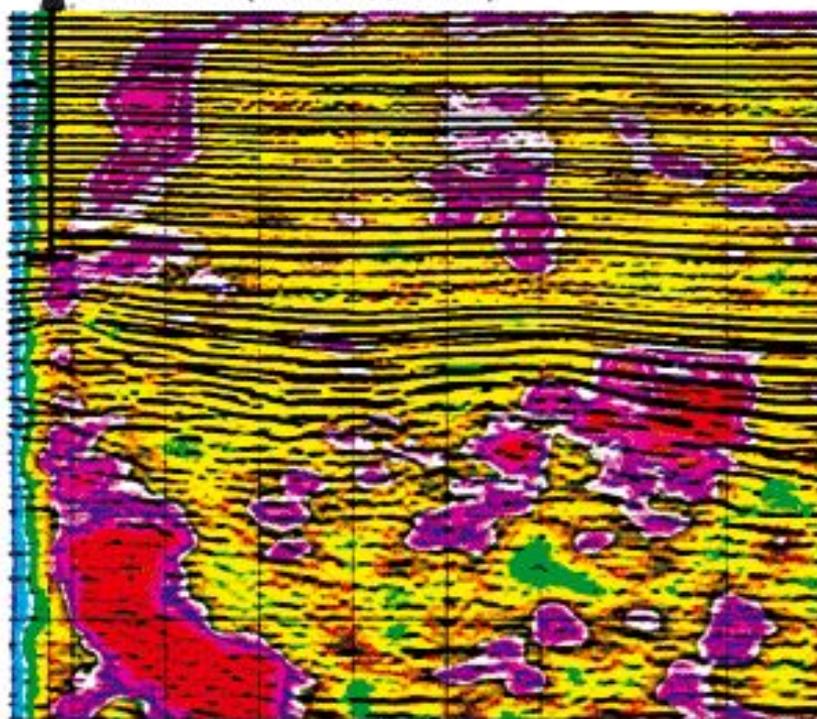
- **Сейсморазведка** основана на изучении особенностей распространения упругих колебаний в земной коре.
- Упругие колебания (сейсмические волны) чаще всего вызываются искусственным путем.
- Упругие волны распространяются во все стороны от источника и проникают в толщу земной коры.
- Здесь они претерпевают отражение и преломление и частично возвращаются к поверхности земли, где регистрируются сейсморазведочной станцией.
- Измеряя время распространения волн и изучая характер колебаний, можно определить глубину залегания и форму тех геологических границ, на которых произошло преломление или отражение волны, а также судить о составе пород, через которые волна прошла на своем



Принципиальная схема сейсморазведки

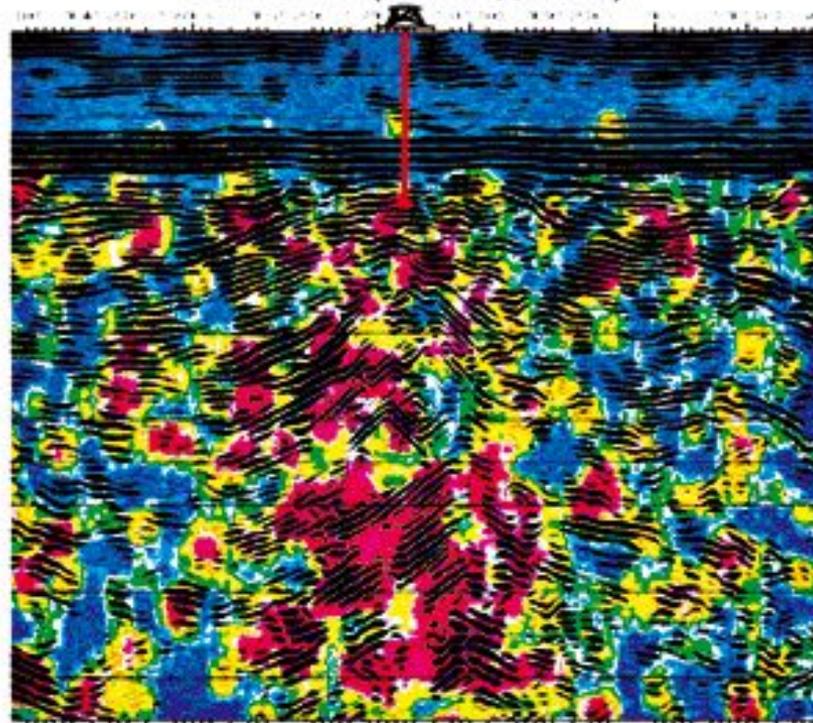
1- источник упругих волн; 2- сейсмоприемники;
3- сеймостанция

Скв. 30 (макс. дебит)



Западная Сибирь,
Северо-Демьянское месторождение

Скв. 219 (макс. дебит)

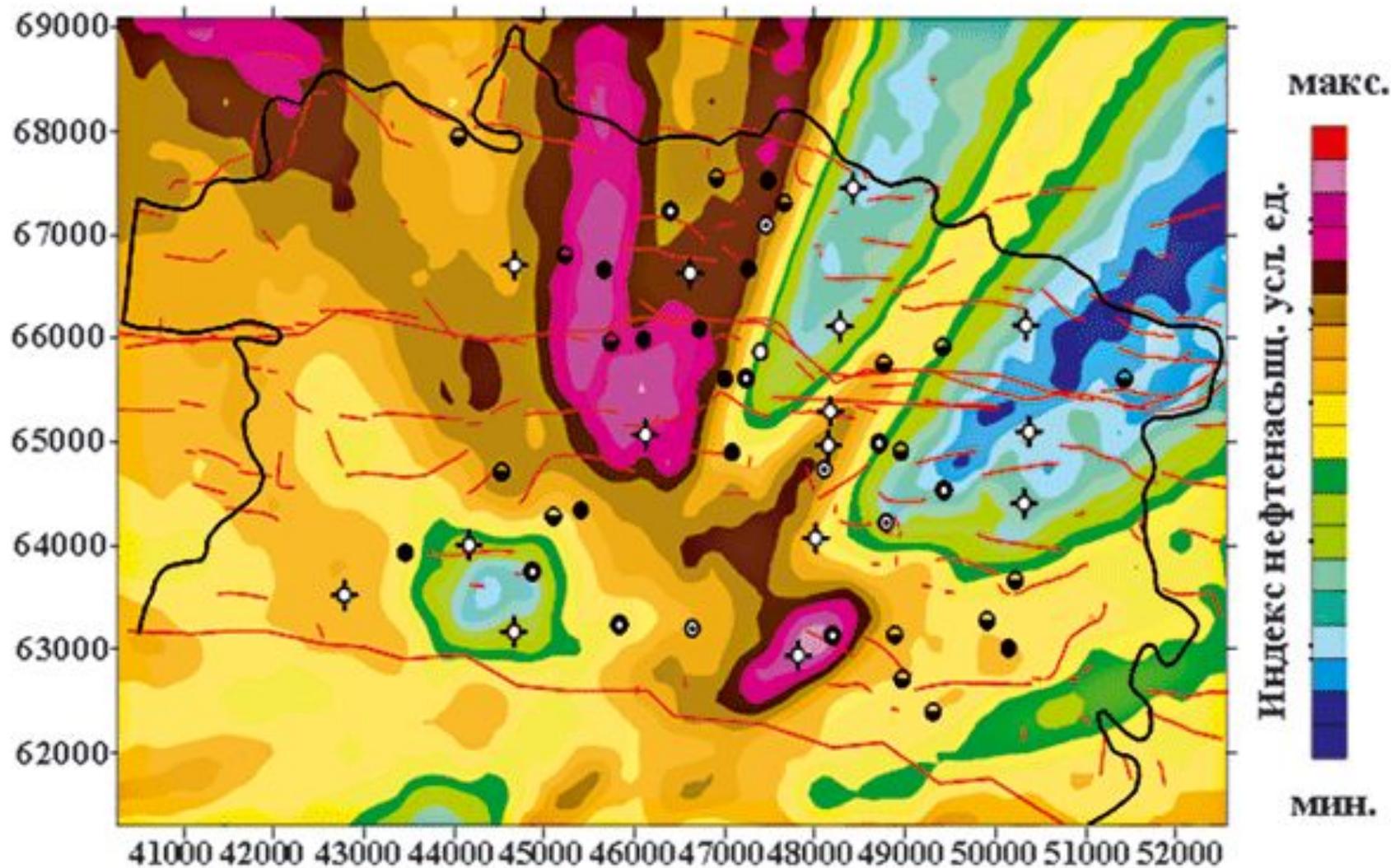


Восточная Сибирь,
Куюмбинское месторождение

- Примеры сейсмических разрезов трещиноватости, на основе которых заложены скважины

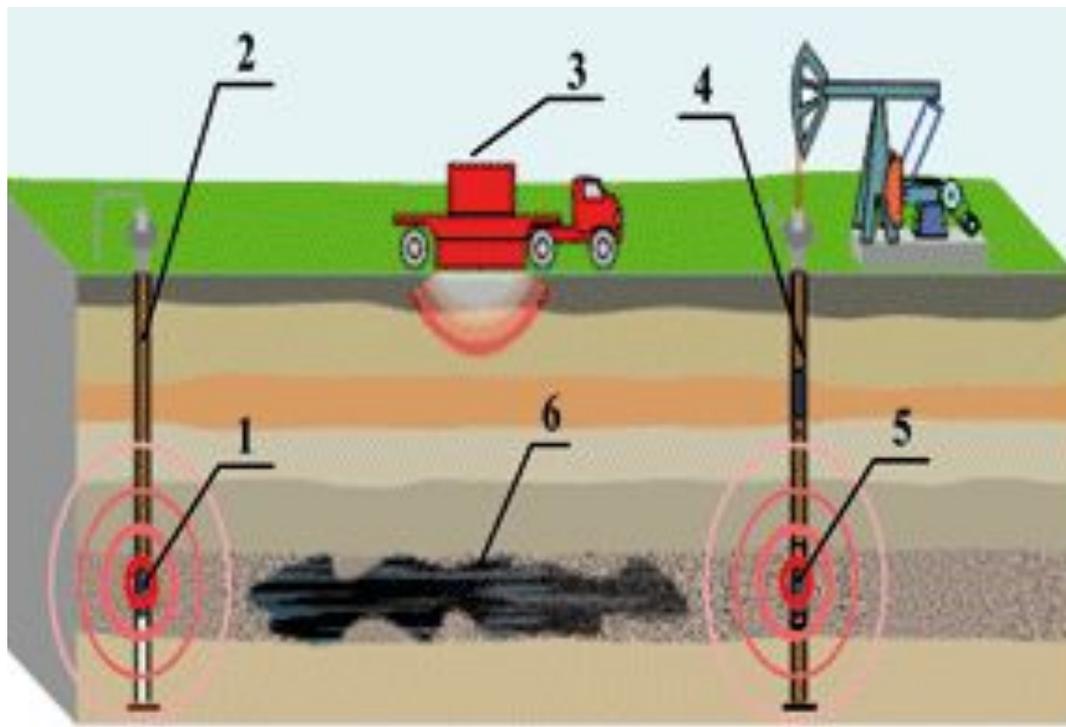


Ситуационная схема наблюдения



Неоднородность нефтесодержания пластов на
 площади 100 км^2

- Технологии сейсмоакустического воздействия **позволяют**:кратно повысить продуктивность и приемистость добывающих и нагнетательных скважин; реанимировать скважины, находящиеся в длительном простое; подключить к работе низкопроницаемые, неоднородные заглинизированные пропластки; вовлечь в разработку слабодренлируемые и застойные зоны; инициировать и интенсифицировать традиционные физико-химические, тепловые, гидродинамические методы увеличения нефтеотдачи; повысить успешность гидроразрыва пласта; эффективность гидроизоляции и др.⁶²



Принципиальная схема комплексного волнового воздействия на пласт из скважины и с поверхности. 1 – забойный волновой генератор на постоянной подвеске, 2 – нагнетательная скважина, 3 – платформа для вибросейсмического воздействия на пласт с поверхности, 4 – добывающая скважина, 5 – импульсная насосная установка, 6 – продуктивный пласт;

- Акустические свойства горных пород широко используются геологами и геофизиками при разведке и доразведке месторождений полезных ископаемых.
- На этапе эксплуатации угольных шахт в широких масштабах применяется *сейсмоакустический метод прогноза* состояния горного массива для выявления зон, опасных по выбросам угля, породы и газа или по горным ударам.

- Для прогноза *горных ударов* на шахтах и в рудниках применяют практически полную аналогию современной сейсмологической аппаратуры и методы обработки сигналов, заимствованные у сейсмологов, адаптированные для наблюдений в пределах шахтного поля. Деятельность службы прогноза горных ударов заключается в многоканальной регистрации сейсмоакустических событий, происходящих в диапазоне частот от нескольких герц до нескольких десятков герц.

- Суть сейсмоакустического метода прогноза зон, потенциально опасных по внезапным выбросам угля и газа, заключается в том, что состояние каждого добычного или проходческого забоя прогнозируется отдельно, а для регистрации акустической эмиссии применяют датчики вибрации, которые размещают в верхней и нижней частях лавы или вблизи от забоя подготовительной выработки.
- Весьма перспективным является прогноз напряженного состояния выбросоопасного массива по спектрам сигналов

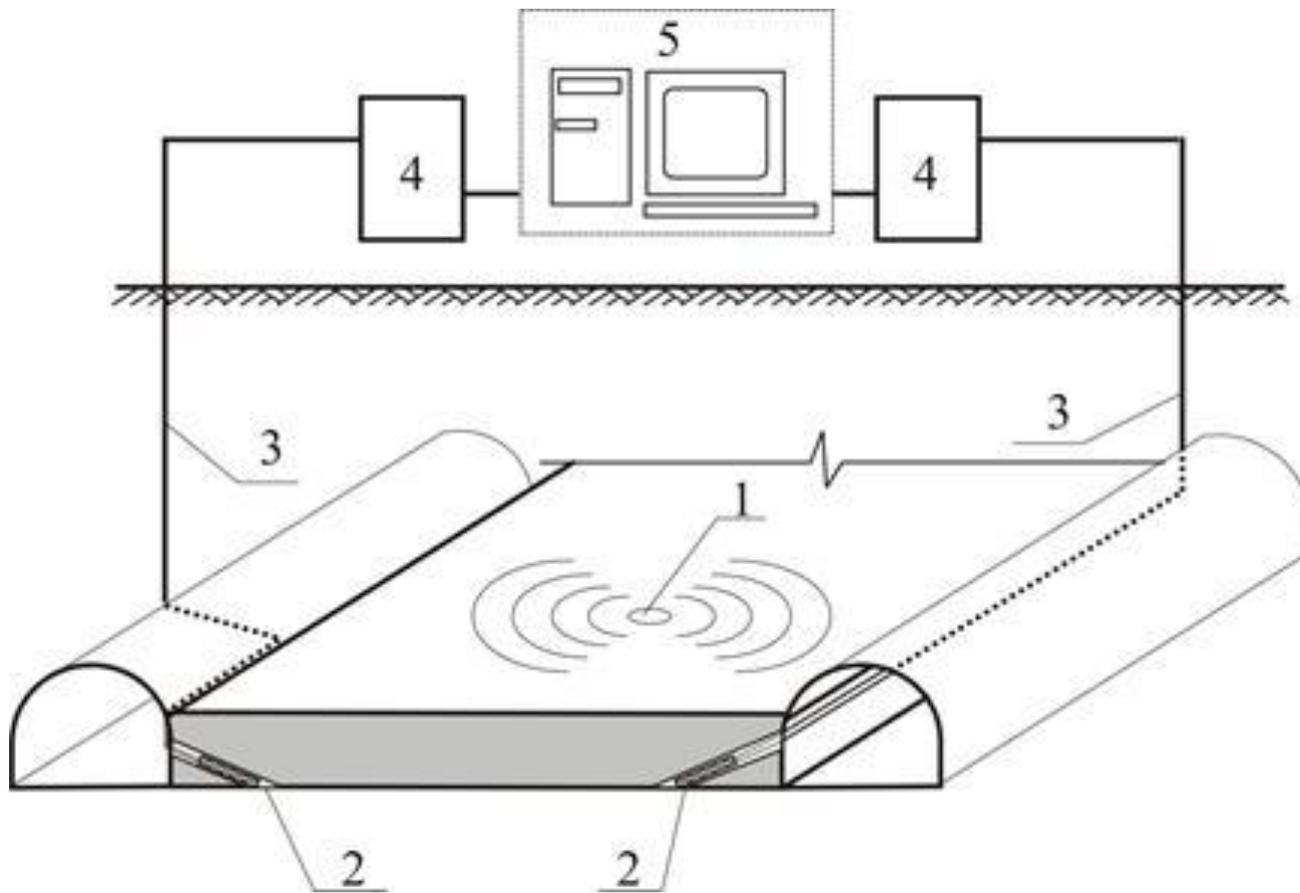


Схема организации сейсмических наблюдений с использованием аппаратуры ЗУА-98:

- 1 – очаг сейсмоакустического события; 2 – передатчик звукоулавливающей аппаратуры; 3 – телефонная линия связи; 4 – приемник звукоулавливающей аппаратуры; 5 – регистратор сейсмоакустической информации