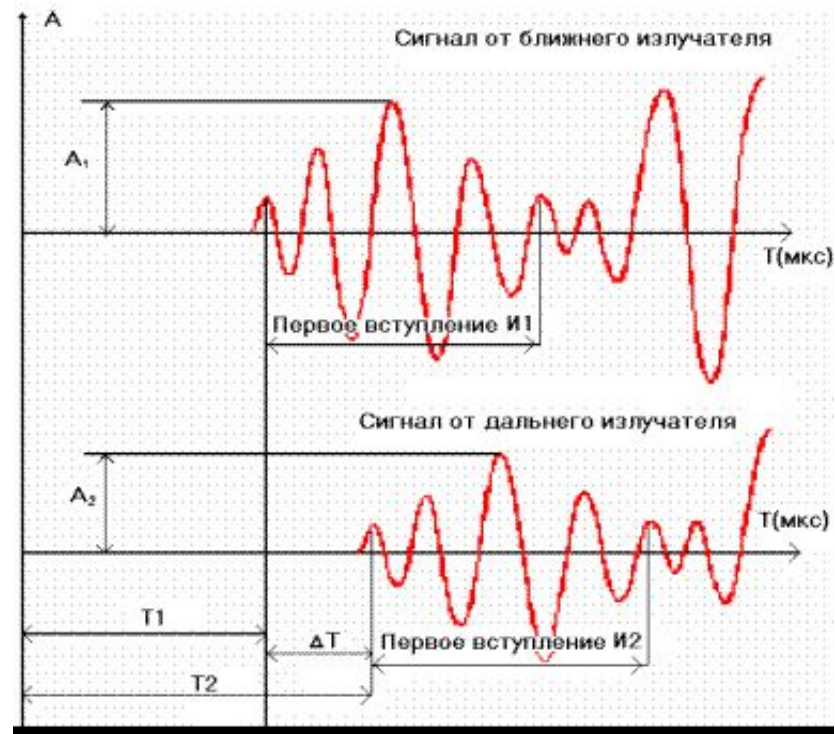


АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КАРОТАЖА

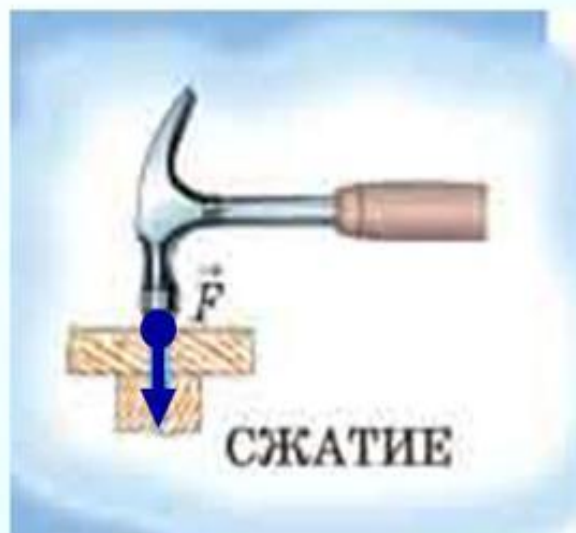
Составитель: асс. Данильева Н.А.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ

- Горные породы являются упругими телами, которые под действием внешней возбуждающей силы, претерпевают деформации объема (растяжение и сжатие) и деформации формы (сдвига).
- Последовательное распространение деформации называется - упругой волной. Первое отклонение частицы от положения покоя называется - вступлением волны.

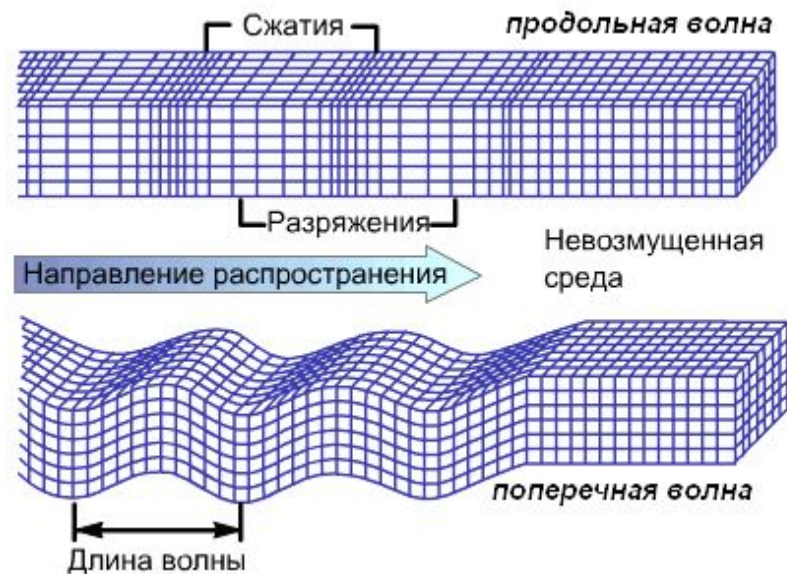


Виды упругих деформаций



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ

- В акустическом каротаже различают (регистрируют) несколько типов волн:
- Продольные волны связаны с деформациями объема твердой или жидкой среды, а поперечные с деформациями только твердой среды. Продольная волна представляет собой перемещение зон сжатия и растяжения вдоль луча, а поперечная - перемещение зон скольжения слоев относительно друг друга в направлении перпендикулярном лучу.



Продольные волны распространяются в 1,5-10 раз быстрее поперечных.

ИЗУЧАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

К этим свойствам относят: частоту волны, длину волны, скорость и амплитуду (затухание).

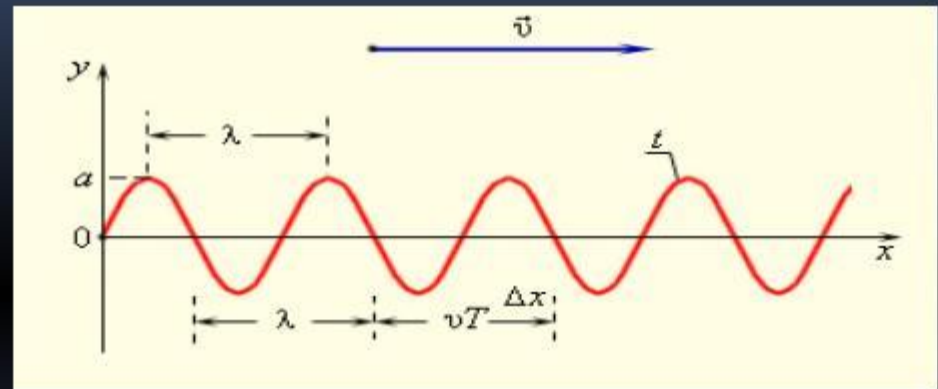
f - частота

λ - длина волны

v_p и v_s - скорость продольной и поперечной волны

A - амплитуда

Упругие (акустические) волны, как и все прочие волны, характеризуются определенным набором свойств.



- ОУ- координата колебаний частиц в волне
- ОХ- направление распространения волны

ИЗУЧАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

- **Упругость** - свойство веществ сопротивляться воздействию механических напряжений.
- Если не превышен предел упругости - деформации обратимы, т.е. восстанавливается форма.
- Твердые тела - изменяется объем и форма. Жидкости и газы - изменяется объем.
- Изменяется объем - объемная деформация, изменяется форма – деформация сдвига.
- **Параметры идеально упругих однородных и изотропных сред:**
 - 1) **Модуль Юнга (E)**
 - 2) **Коэффициент Пуассона (ν)**
 - 3) **Коэффициент сжимаемости B**
 - 4) **Модуль всестороннего сжатия K .**

СВЯЗЬ СКОРОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ УПРУГОСТИ

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\delta(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{3(1-\nu)}{\beta \cdot \delta(1+\nu)'}}$$

δ - плотность сплошной среды.

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\beta \cdot \delta} \cdot \frac{(1-2\nu)}{(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\delta}}$$

G - модуль сдвига,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Отношение скоростей V_p и V_s имеет вид:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{2 \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)}}$$

Обратные зависимости, когда по скоростям следует определить модуль упругости сред имеют вид

Модуль Юнга

$$E = \frac{\delta \cdot V_s^2 (3 \cdot V_p^2 - 4 \cdot V_s^2)}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

Коэффициент Пуассона

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

Модуль сдвига

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

Модуль объемного сжатия

$$K = \frac{1}{\beta} = \delta \cdot \left(V_p^2 - \frac{4}{3} \cdot V_s^2 \right)$$

ЧАСТОТА

- Под влиянием деформаций частота колебаний частиц среды может быть самой различной в зависимости от частоты генератора, возбуждающего колебания и частоты собственных колебаний тела.

Упругие волны по частоте f разделяются на:

1) *инфразвуковые* - $f < 20$ Гц;

2) *звуковые* - $f = 20-20 \cdot 10^3$ Гц;

3) *ультразвуковые* - $f > 20 \cdot 10^3$ Гц;

4) *гиперзвуковые* - $f > 10^{10}$ Гц.

Частота гиперзвуковых колебаний приближается к f тепловых колебаний молекул ($f = 10^{13}$ Гц).

Вид исследований	Используемые частоты (для продольных волн), Гц
Сейсмические профильные наблюдения на поверхности земли (МОВ, МПВ, КМПВ)	30–100
Сейсмическое просвечивание горных массивов	30–100
Сейсмическое профилирование и просвечивание в горных выработках	70–300
Акустическое профилирование и просвечивание в горных выработках и на обнажениях	1000–5000
Акустический и ультразвуковой каротаж	20 000–50 000
Ультразвуковые наблюдения в шпурах и на обнажениях	20 000–50 000
Ультразвуковые исследования образцов	20 000–50 000

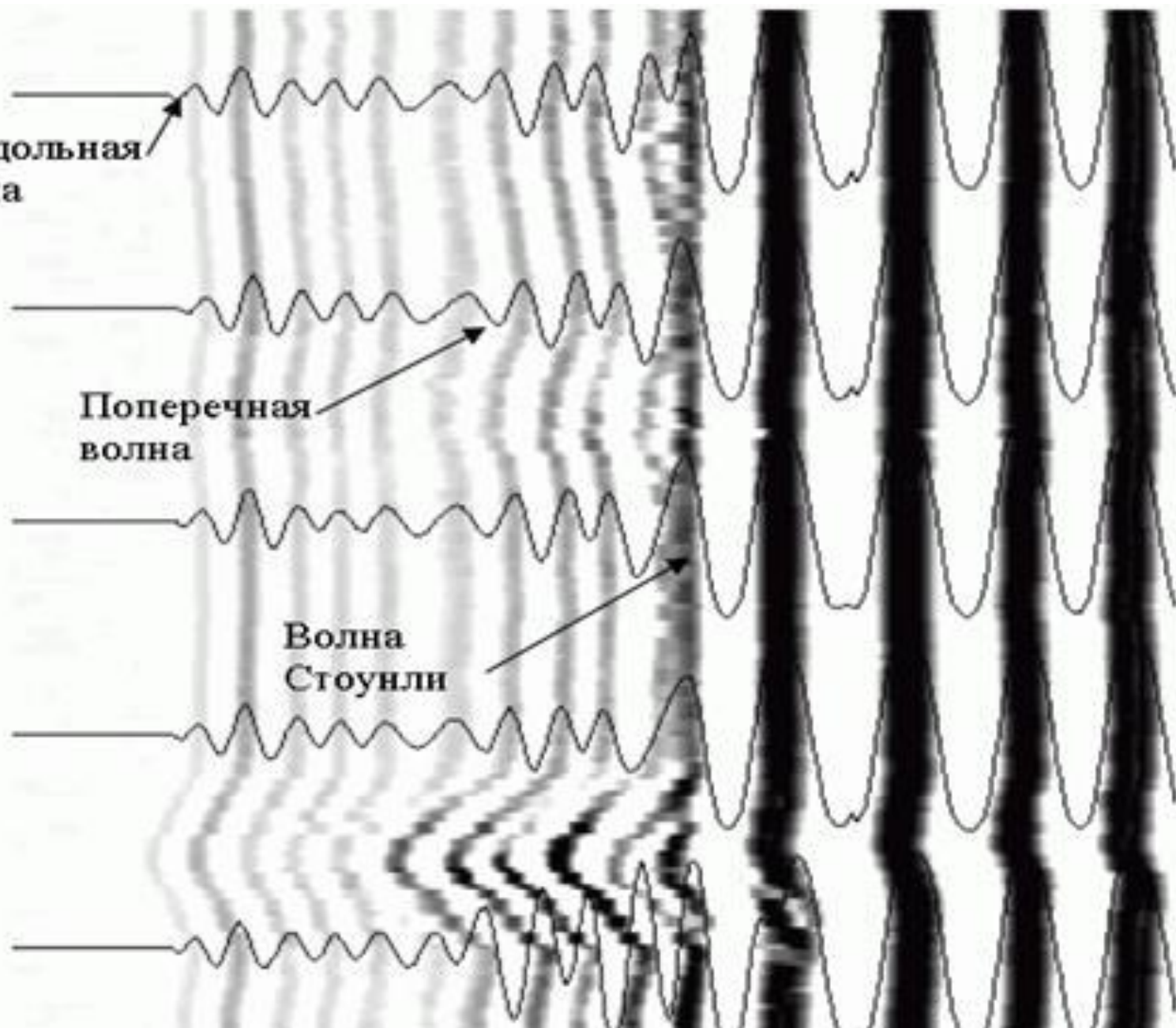
РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН

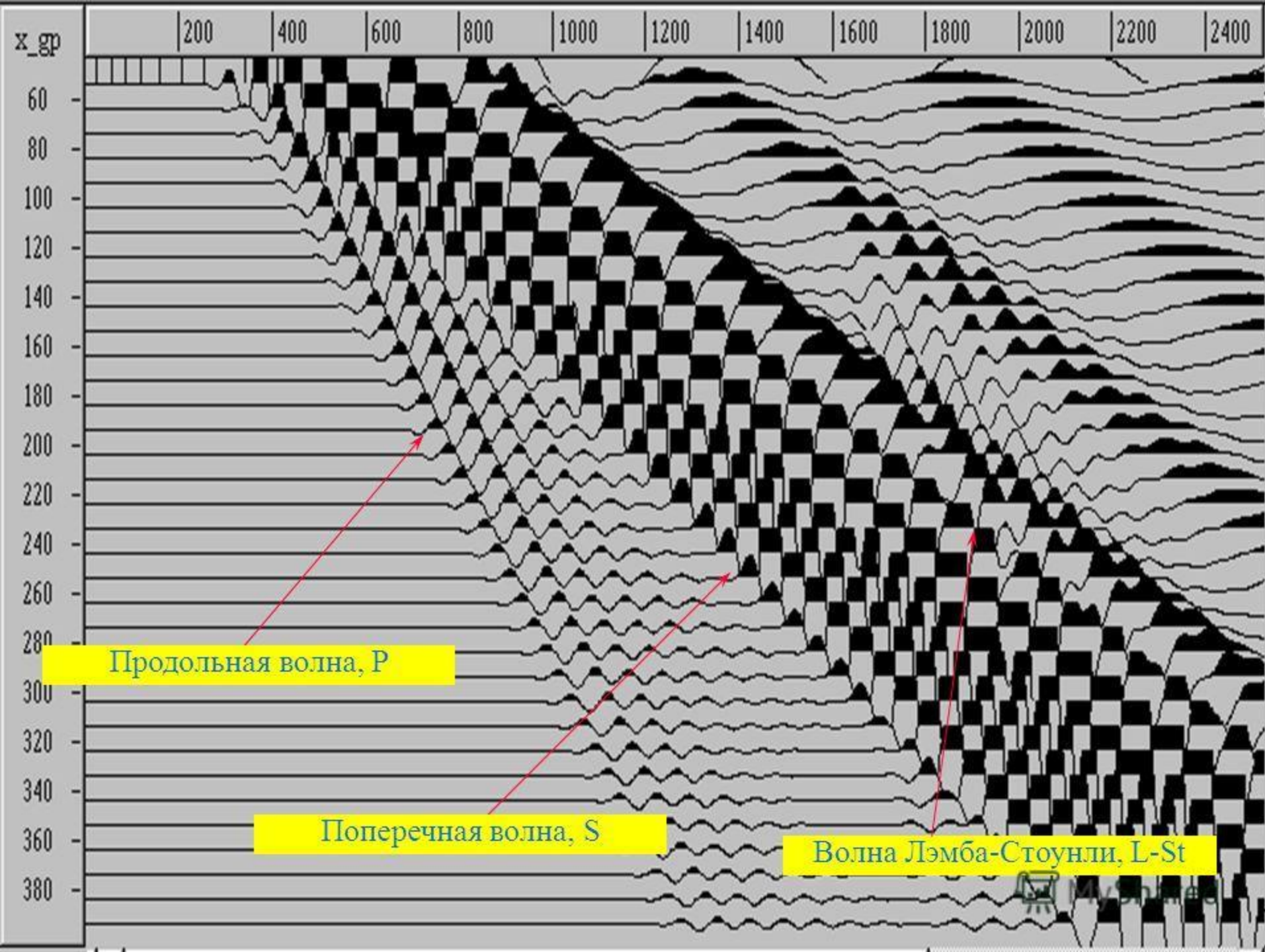
- ◎ **Сейсмические волны** - волны низкой частоты, которые вызываются ударом, взрывом, землетрясением. Эти волны быстро затухают.
- ◎ **Продольные волны** - волны расширения-сжатия, распространяются в любой среде - газах, жидкостях, твердых телах. Именно продольные волны вызывают звуковые явления.
- ◎ **Поперечные волны** - волны, обусловленные распространением поперечных деформаций сдвига в среде; возникают только в твердых телах, так как в жидкостях и газах сопротивление сдвигу отсутствует.
- ◎ Волны ***P*** и ***S*** распространяются по всему объему и называются объемными. На поверхности в твердых телах возникают поверхностные волны в силу изменения сопротивления перемещению частиц в сторону свободной поверхности.

Продольная
волна

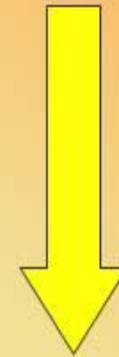
Поперечная
волна

Волна
Стоунли





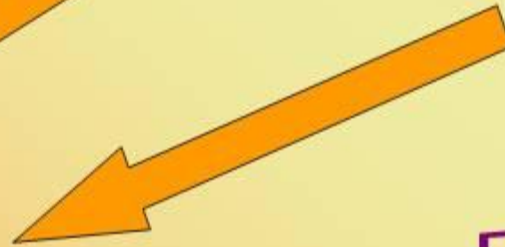
упругая среда



газообразная

жидкая

твердая



продольные

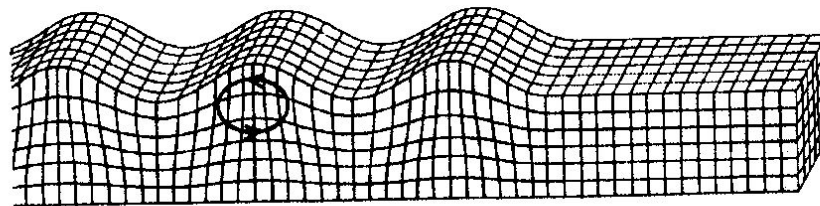
поперечные

Волны

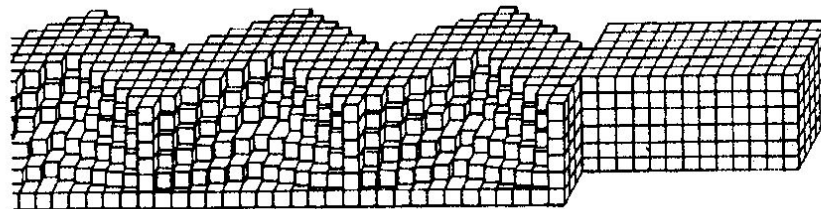
ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ

- 1) *Рэлея* - частицы колеблются по траектории в вертикальной плоскости.
- 2) *Лява* — частицы колеблются по траектории в горизонтальной плоскости.

Волна Рэлея



Волна Лява



УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

В реальных условиях различия в значениях V_p при смене флюидов (вода-нефть) в поровом пространстве осадочных пород *не превышают 5%*.

Скорость продольных волн увеличивается с ростом минерализации воды и давления. Наибольшим градиентом увеличения скорости характеризуется **раствор NaCl**. Максимальное увеличение скорости в насыщенном растворе NaCl по сравнению с дистиллированной водой составляет 250-270 м/с.

Значения сейсмоакустических параметров некоторых жидких и газообразных сред, льда при нормальных термобарических условиях ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 0,1 МПа)

Фаза	Плотность g/cm^3	Скорость $V_p, m/s$	Коэффициент поглощения α_p, m^{-1}	
			на частоте 10^2 кГц	на частоте 10^4 кГц
Вода пресная	1,00	1485	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-1}$
Нефть	0,85–0,9	1300	–	–
Воздух	0,00129	331	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^3$
Метан	0,0007	≈ 490	–	–
Лед	0,918	3200–3300	–	–

◎ **Скорости упругих волн в магматических и метаморфических породах**

- ◎ Сейсмические свойства магматических и метаморфических пород *определяются в значительной мере особенностями химического и минерального состава, текстурно-структурными факторами, характером порового заполнителя.*
- ◎ **В магматических породах** в ряду гранит-габбро-перидотит наблюдается возрастание средней скорости продольных и поперечных волн с ростом основности. Широкий диапазон значений скорости в эффузивных породах обусловлен колебанием пористости, различием первоначальной структуры пород и их последующим диагенезом. Степень кристаллизации не оказывает существенного влияния на величину скорости упругих волн.
- ◎ **Для метаморфических пород** также характерна зависимость скорости упругих волн от минерального состава и основности пород. Например, средняя скорость в гнейсе биотитовом составляет 5600 м/с, в гнейсе амфиболовом - 5900 м/с, в амфиболите - 6500 м/с, в амфиболите с гранатом - 6800 м/с. *в породах близкого минерального состава скорость волн возрастает от низших стадий метаморфизма к высшим за счет уплотнения пород.*

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Скорости упругих волн в магматических породах [48]

Порода	$V_P, \text{ м/с}$		$V_S, \text{ м/с}$
	Средняя	$V_{P\min} - V_{P\max}$	
Гранит биотит-амфиболовый	5600	5200–5600	2800–3600
Гранодиорит	5900	5700–6100	3000–3600
Кварцевый диорит	6100	5600–6200	–
Габбро и габбро-норит	6400	6100–6800	3000–4100
Пироксенит	7400	6500–7800	3600–4300
Перидотит	8100	7800–8300	4000–4500
Липарит	5000	4500–5200	2500–3400
Андезит и андезито-базальт	5500	4800–5900	–
Базальт	5800	5000–6200	2800–3600
Обсидиан	5800	5500–5900	3600–3800

⦿ *Скорости упругих волн в осадочных породах*

- ⦿ Сейсмоакустические свойства осадочных пород определяются составом, пористостью, характером структурных связей, диагенезом пород и свойствами заполнителя порового пространства.
- ⦿ В общем случае скорость продольных волн в осадочных породах изменяется от 300 до 7000 м/с. Отношение V_s/V_p в водонасыщенных глинах составляет 0,05-0,12, в песках - 0,07-0,2.
- ⦿ Наибольшее влияние на сейсмоакустические свойства основных групп пород, выделяемых в инженерной геологии, - обломочно-песчаных (рыхлых), глинистых (связных) и скальных (жестких) - оказывают характер структурных связей и фазовый состав породы.
- ⦿ Максимальные значения скоростей продольных волн наблюдаются в уплотненных карбонатных породах (3500-5000 м/с). При пористости 1-2% значения V_p в осадочных породах близки к значениям скоростей в кислых магматических и метаморфических породах.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

**Сейсмические свойства пород различных типов
в неводонасыщенном состоянии вблизи дневной поверхности**

Породы	$V_P, \text{ м/с}$	$V_S, \text{ м/с}$	V_S/V_P	$\alpha_P, \text{ м}^{-1}$ ($f = 80\text{--}110 \text{ Гц}$)	$\alpha_S, \text{ м}^{-1}$ ($f = 50\text{--}80 \text{ Гц}$)
Скальные слаботрещиноватые (граниты, песчаники, известняки)	3500–5000	2000–3000	0,5–0,6	0,01–0,06	0,01–0,08
Крупнообломочные и песчаные (галечники, гравий, песок)	200–800	150–500	0,5–0,7	0,1–0,18	0,13–0,18
Глинистые (суглинки, глины)	300–1800	100–400	0,1–0,5	0,08–0,19	0,1–0,21

**Скорости упругих волн для пород верхней части разреза
(по Н.Н. Горяинову, Ф.М. Ляховицкому)**

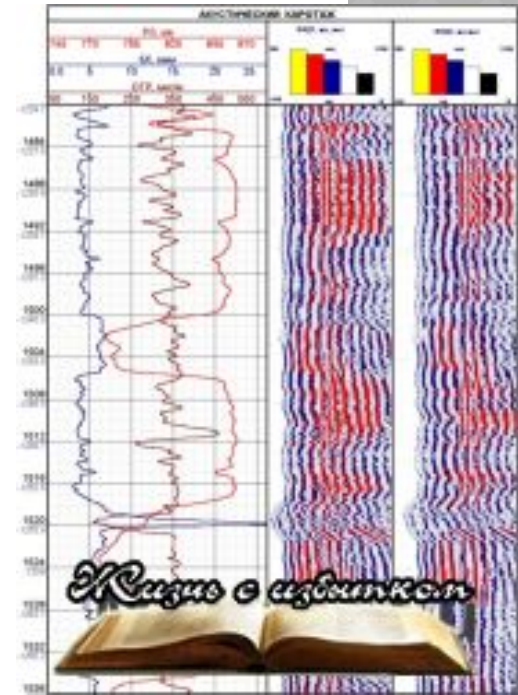
Породы	Состояние породы	$V_P, \text{ м/с}$	$V_S, \text{ м/с}$	V_S/V_P
Галечники	Неводонасыщенное	400–800	250–500	0,60–0,70
Пески		200–500	150–300	0,50–0,70
Супеси		250–550	120–280	0,45–0,60
Суглинки		300–600	100–250	0,30–0,55
Глины (включая коренные)		400–1800	100–400	0,10–0,35
Песчаники		800–4000	500–2500	0,50–0,70
Известняки		1000–4500	500–2800	0,50–0,65
Галечники	Водонасыщенное	2000–2700	250–500	0,10–0,20
Пески		1500–2000	150–300	0,07–0,20
Супеси		1450–1800	120–280	0,07–0,15
Суглинки		1500–1900	100–250	0,05–0,15
Глины (включая коренные)		1800–2500	100–400	0,05–0,12
Песчаники		1800–4500	500–2500	0,40–0,60
Известняки		2000–5000	500–2800	0,35–0,55
Галечники	Влагонасыщенное при $t = -3 \text{ }^\circ\text{C}$	3800–4800	2000–2600	0,50–0,60
Пески		3400–4000	1800–2200	0,50–0,60
Супеси		2800–3500	1500–1900	0,45–0,60
Суглинки		2200–2800	1200–1500	0,40–0,55
Глины		1900–2300	800–1200	0,40–0,50
Песчаники		3600–5000	1900–2800	0,50–0,60
Известняки		3800–5500	2000–3000	0,50–0,60

АКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ (АК)

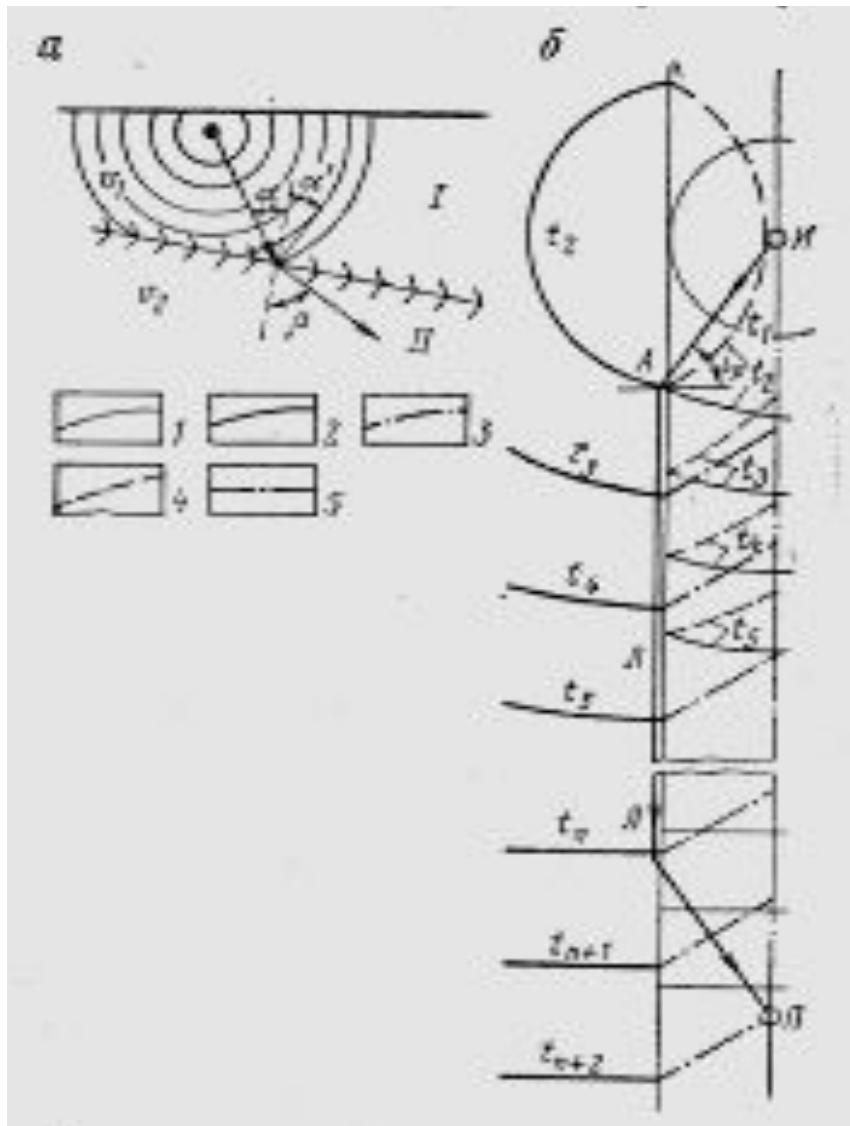
- ◎ *Акустический каротаж (АК) основан на изучении характеристик продольных упругих волн ультразвукового и звукового диапазона в горных породах.*
- ◎ *При АК в скважине возбуждаются упругие колебания, которые распространяются в ней и в окружающих породах и воспринимаются приемниками, расположенными в той же скважине.*

АК

- Акустический каротаж на преломленных волнах предназначен для измерения интервальных времен Δt ($\Delta t = 1/v$, где v - скорость распространения волны, м/с), амплитуд A и коэффициентов эффективного затухания α преломленной продольной, поперечной, Лэмба - Стоунли продольных волн, распространяющихся в горных породах, обсадной колонне и по границе жидкости, заполняющей скважину, с горными породами или обсадной колонной. Единицы измерения - микросекунда на метр (мкс/м), безразмерная (для A) и α -децибел на метр (дБ/м) соответственно.



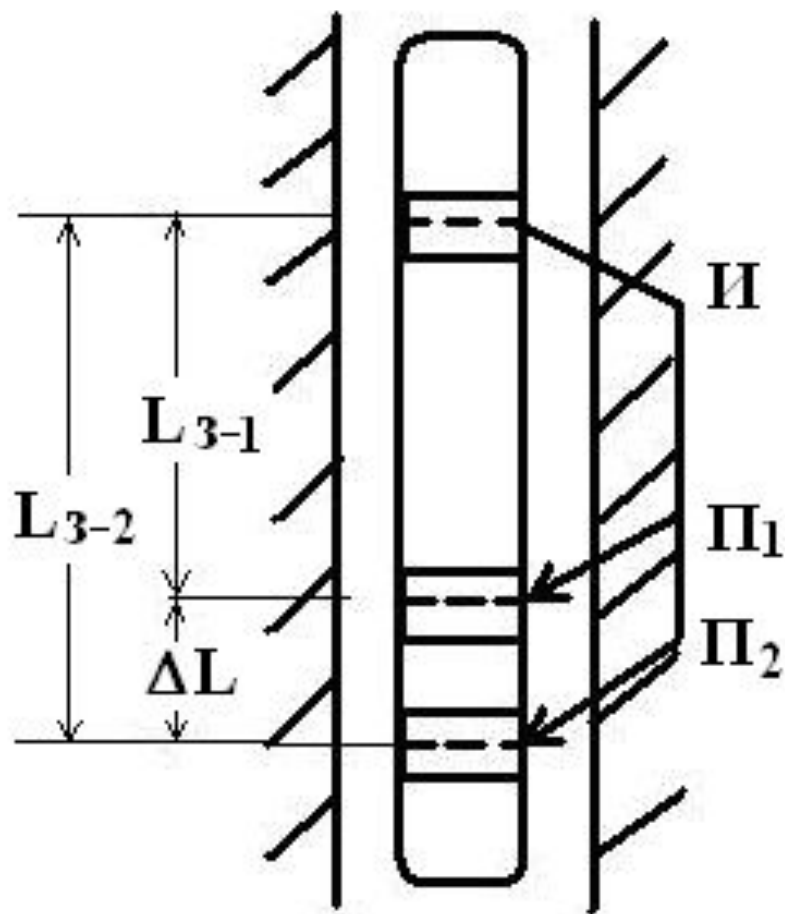
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА



Прохождение волны через границу двух сред (а) и распространение упругих волн от расположенного в скважине импульсного сферического излучателя (б)

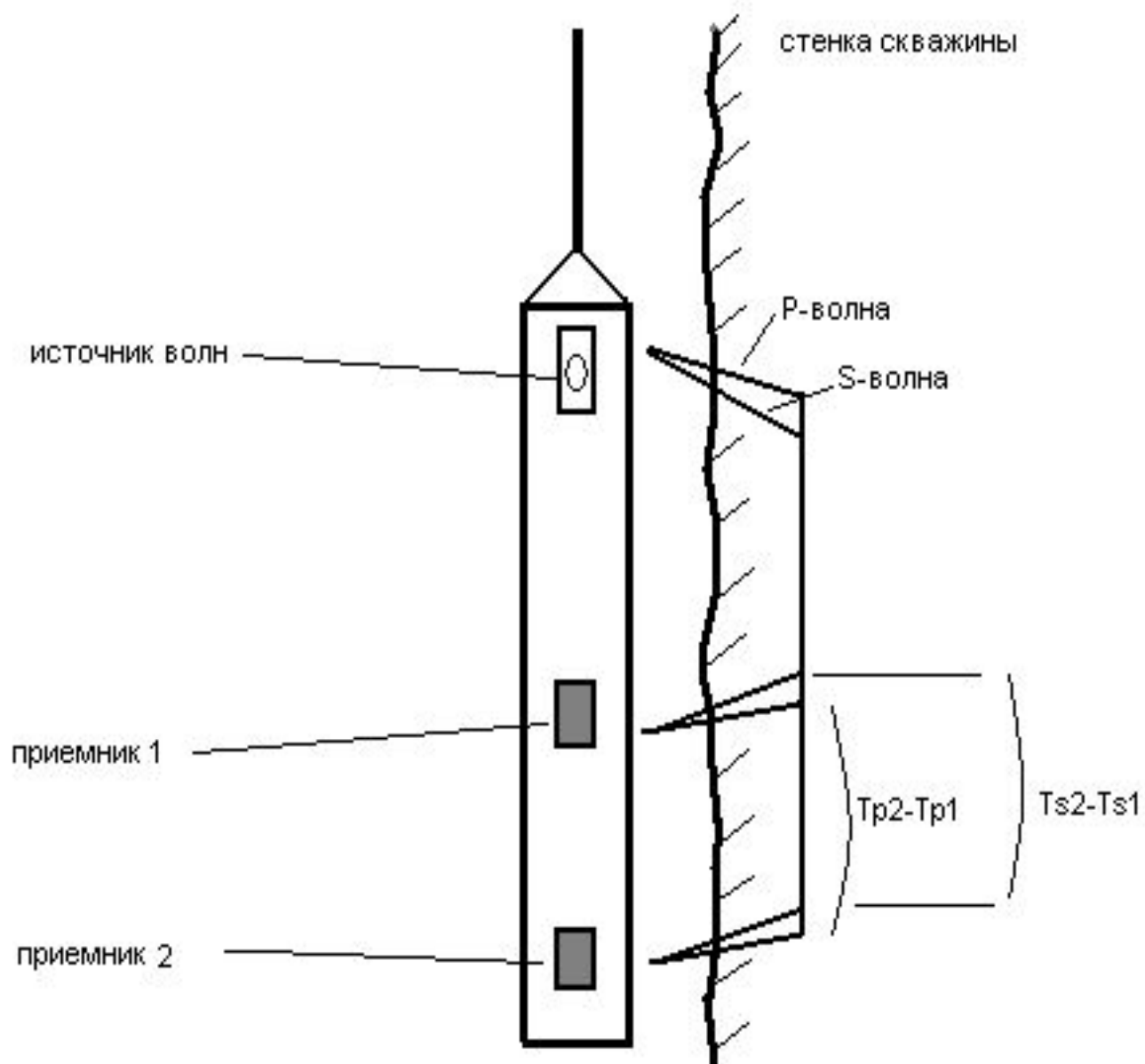
α — угол падения (угол между лучом падающей волны и перпендикуляром к границе раздела); α' — угол отражения; β — угол преломления (угол луча проходящей волны с перпендикуляром к границе раздела); v_1 и v_2 скорости распространения волн в средах I и II; фронты волн в последовательные моменты времени t_1, t_2, \dots, t_{n+2} : 1 - падающей (прямой) P_1 , 2 - проходящей P_{12} , 3 — головной P_{12P} , 4 — отраженной P_{11} , 5 — ось скважины

АППАРАТУРА

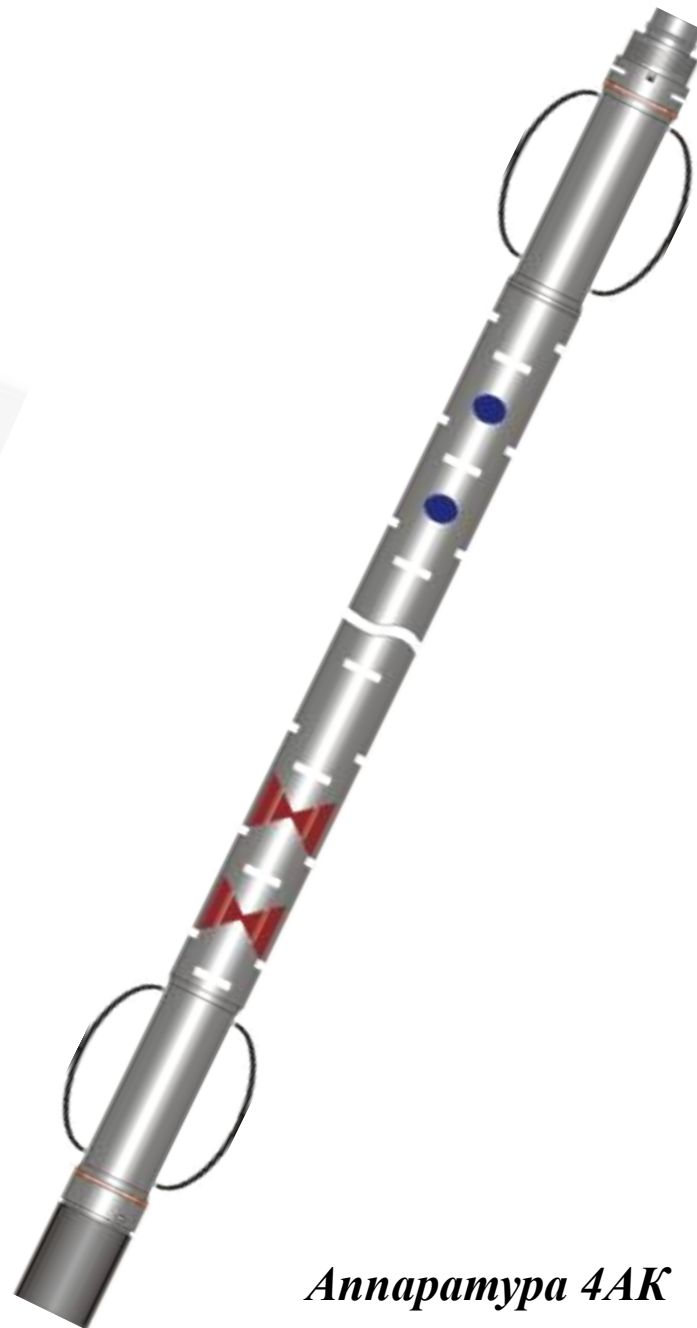
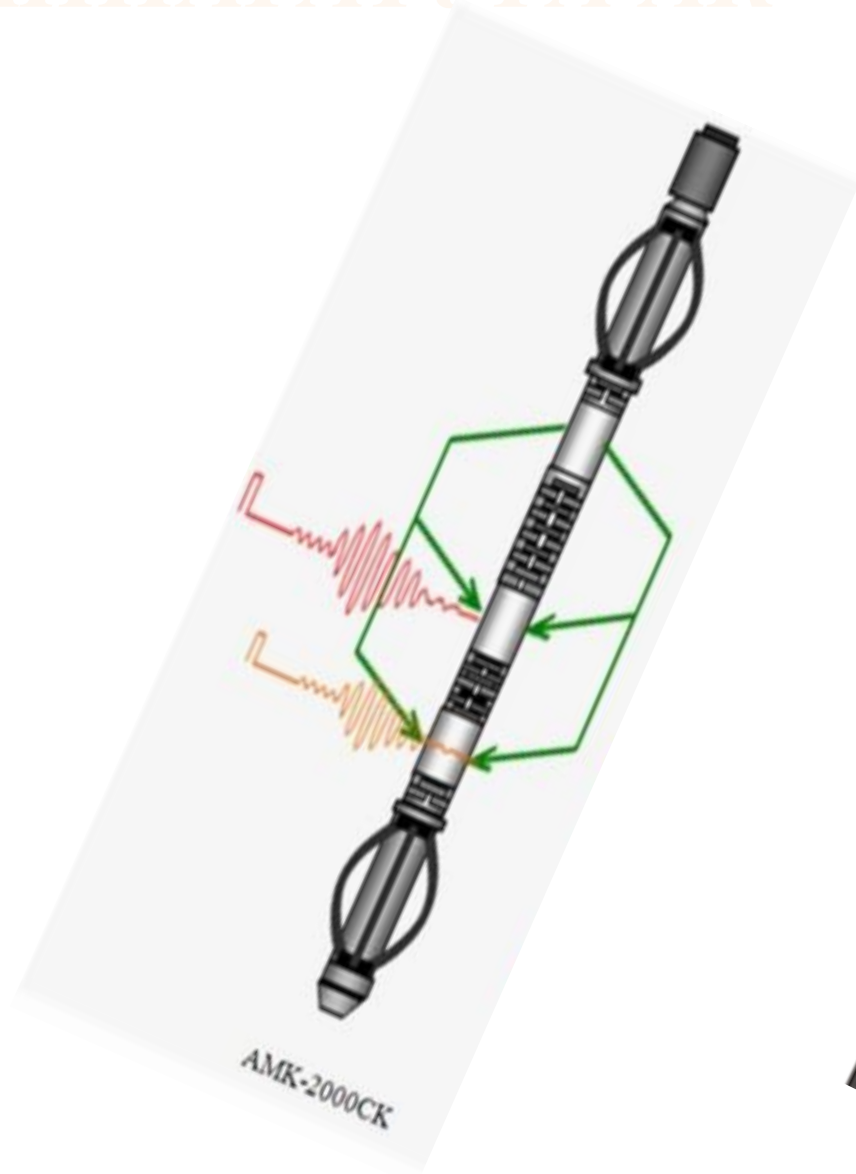


- *Установка акустического каротажа (трехэлементный зонд)*
- *И – излучатель, П1 и П2 – приемники, ΔL – длина базы зонда*
- *Скорость проведения 700-1500 м/ч*

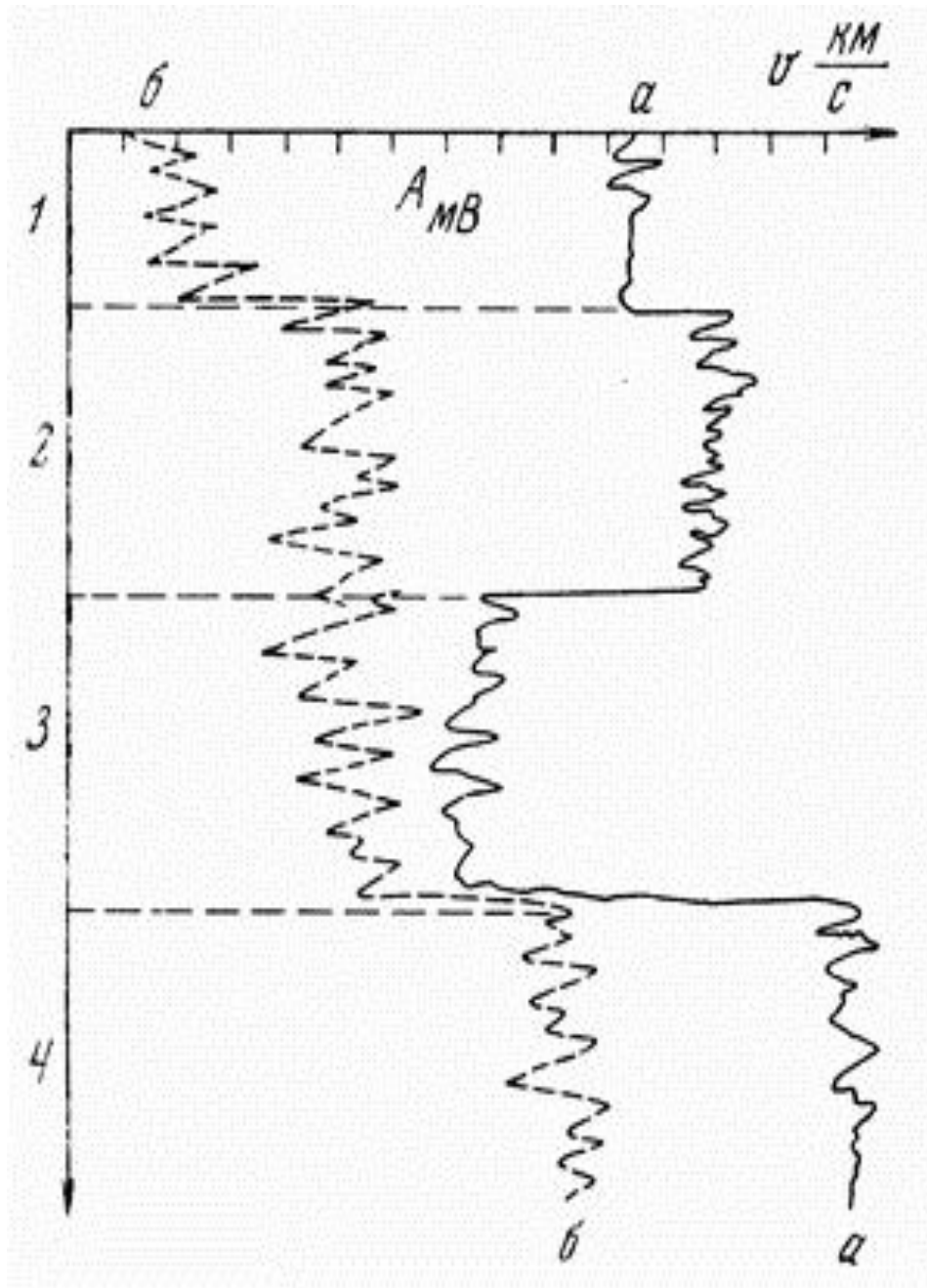
СХЕМА ПРИБОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АК



АППАРАТУРА АК



Аппаратура 4АК



- **Общий вид диаграммы скорости (а) и амплитуды (б) при акустическом каротаже: 1 - породы средней пористости, сухие; 2 - породы средней пористости, влажные; 3 - породы высокой пористости; 4 - породы низкой пористости, плотные**

РЕЗУЛЬТАТЫ АК

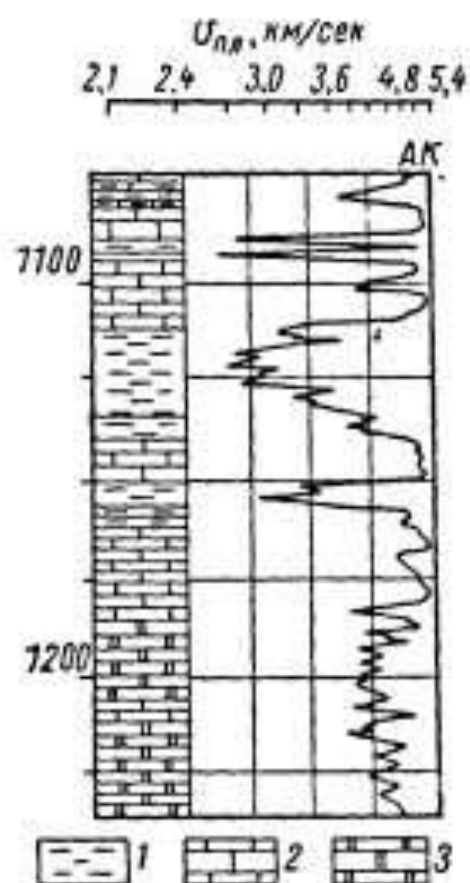


Рис. 191. Сопоставление диаграммы акустического каротажа с литологическим разрезом скважины.

1 — глины; 2 — известняк; 3 — доломит; АК — кривая акустического каротажа.

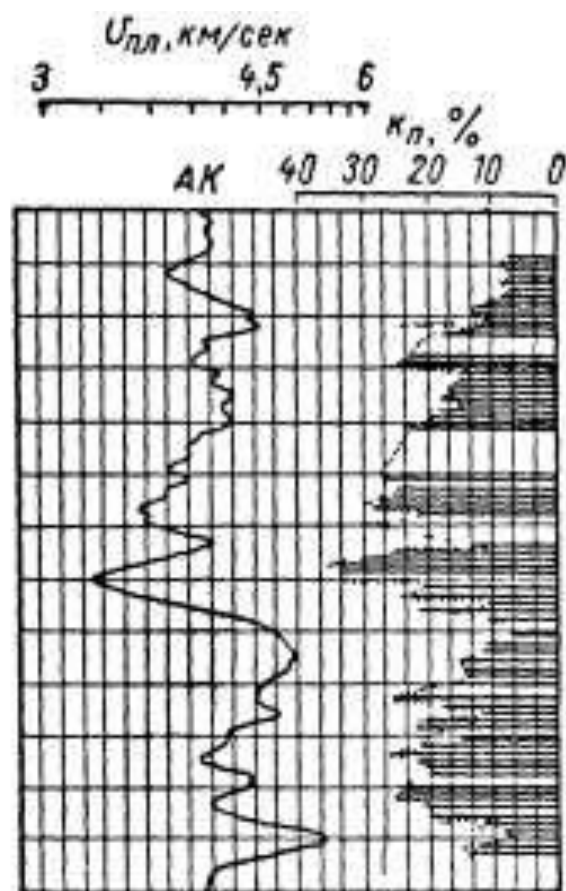
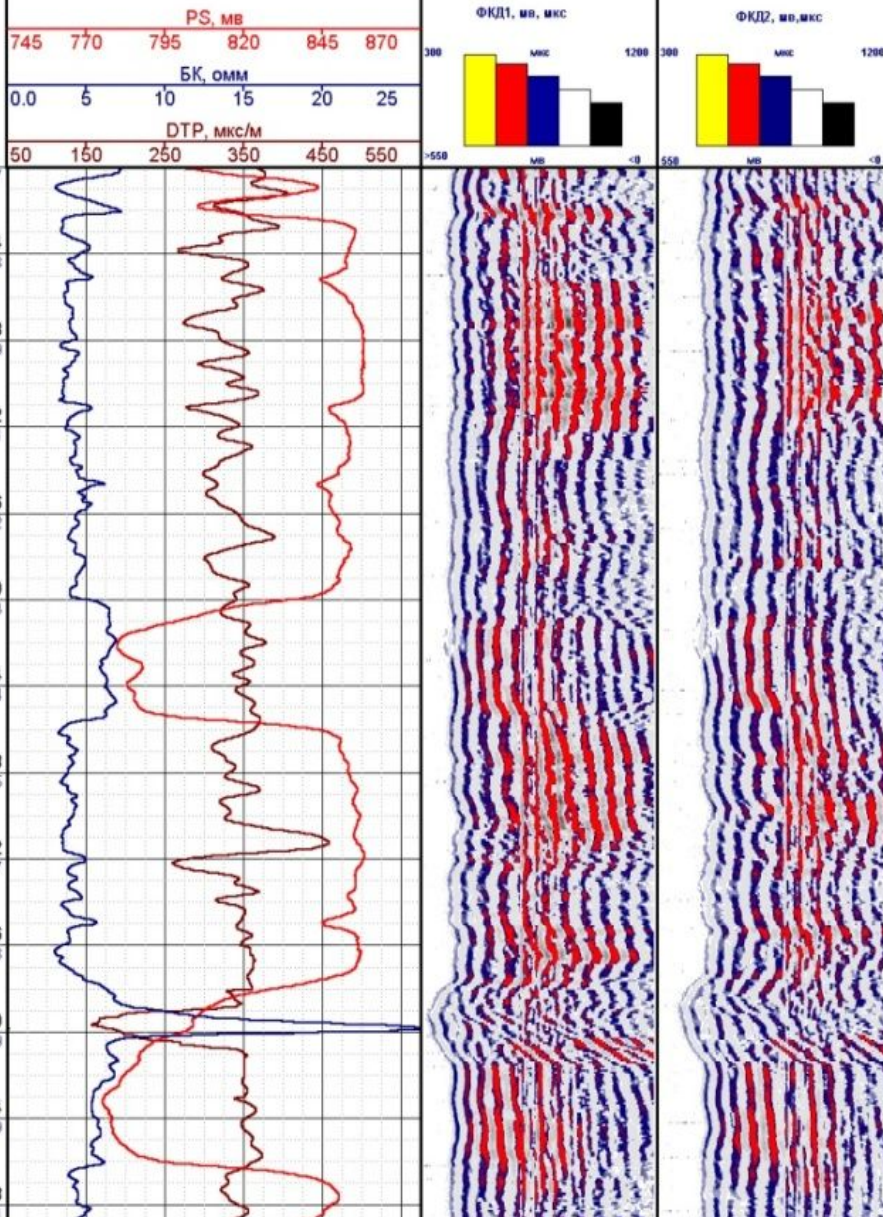


Рис. 192. Сопоставление кривой акустического каротажа (карбонатный разрез) с коэффициентом пористости (K_p , %).

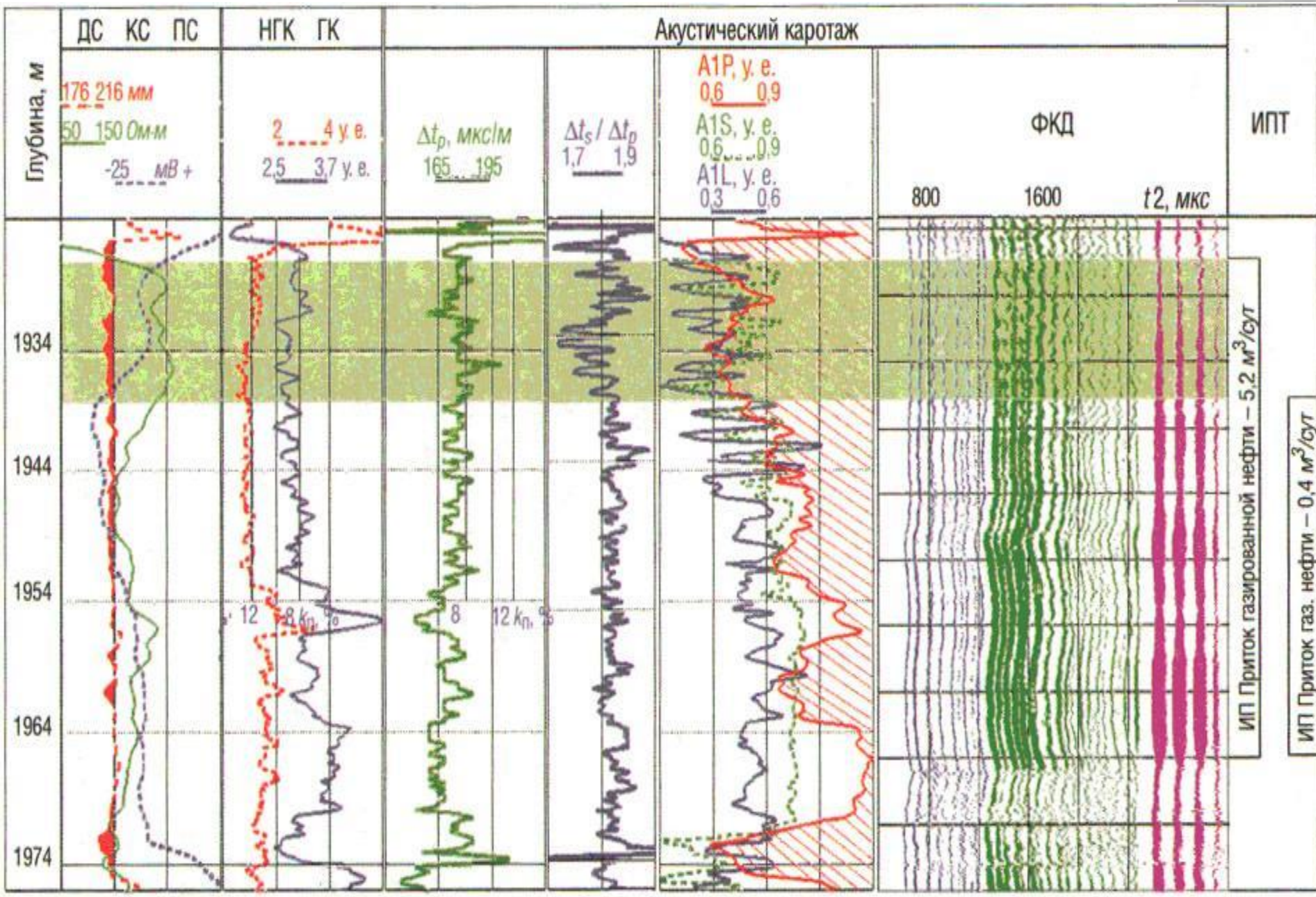
$v_{пл}$ — пластовая скорость.

КАРОТАЖНЫЕ ДИАГРАММЫ АК

АКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ



- ⊙ *PS – каротаж ПС*
- ⊙ *БК – боковой каротаж*
- ⊙ *DTP – акустический каротаж*



ИП Приток газ. нефти - 0,4 м³/сут

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

- Оценка пористости и типа порового пространства;
- Оценка характера насыщения ($V_n=1300$ м/с, $V_g=490$ м/с, $V_b=1460-1540$ м/с);
- Оценка прочностных свойств пород;
- Уточнение данных наземной сейсморазведки;
- Изучение технического состояния скважины.
- для литологического расчленения разрезов и расчета упругих свойств пород;
- локализации трещиноватых пород, трещин гидроразрывов и интервалов напряженного состояния пород;
- определения коэффициентов межзерновой и вторичной (трещинно-каверновой) пористости коллекторов и характера их насыщенности;
- выделения проницаемых интервалов в чистых и глинистых породах;
- расчета синтетических сейсмограмм и интеграции результатов скважинных измерений с наземными и скважинными сейсмическими данными.

ВОЛНОВОЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ

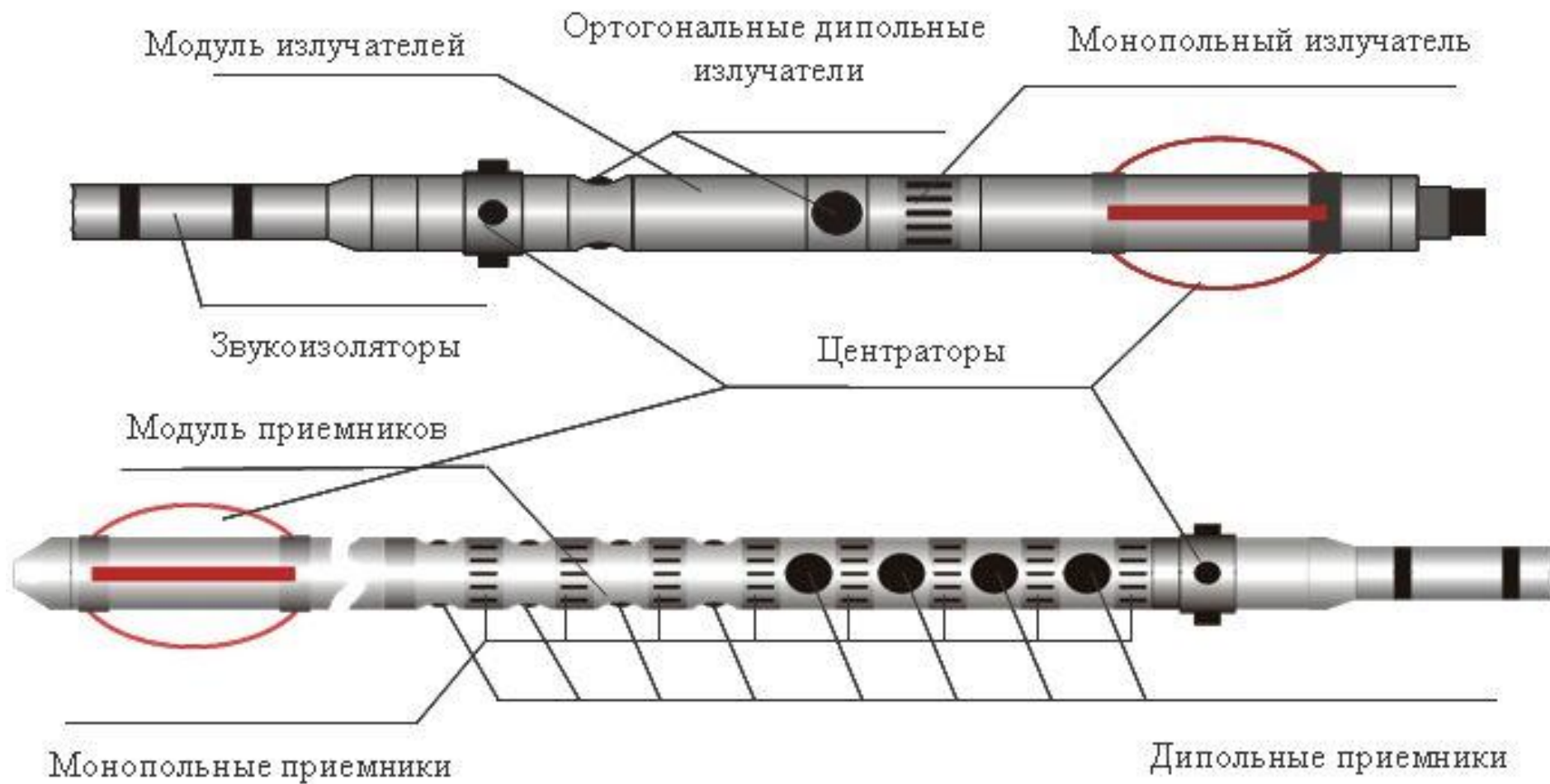
- ◎ Основан на возбуждении и регистрации полной волновой характеристики среды (продольные, поперечные, трубные, обменные волны и т.д.).
- ◎ Частота излучения продольной, поперечной, волны Релея– 10-20 кГц
- ◎ Частота излучения волн Стоунли или Лэмба– 3 кГц

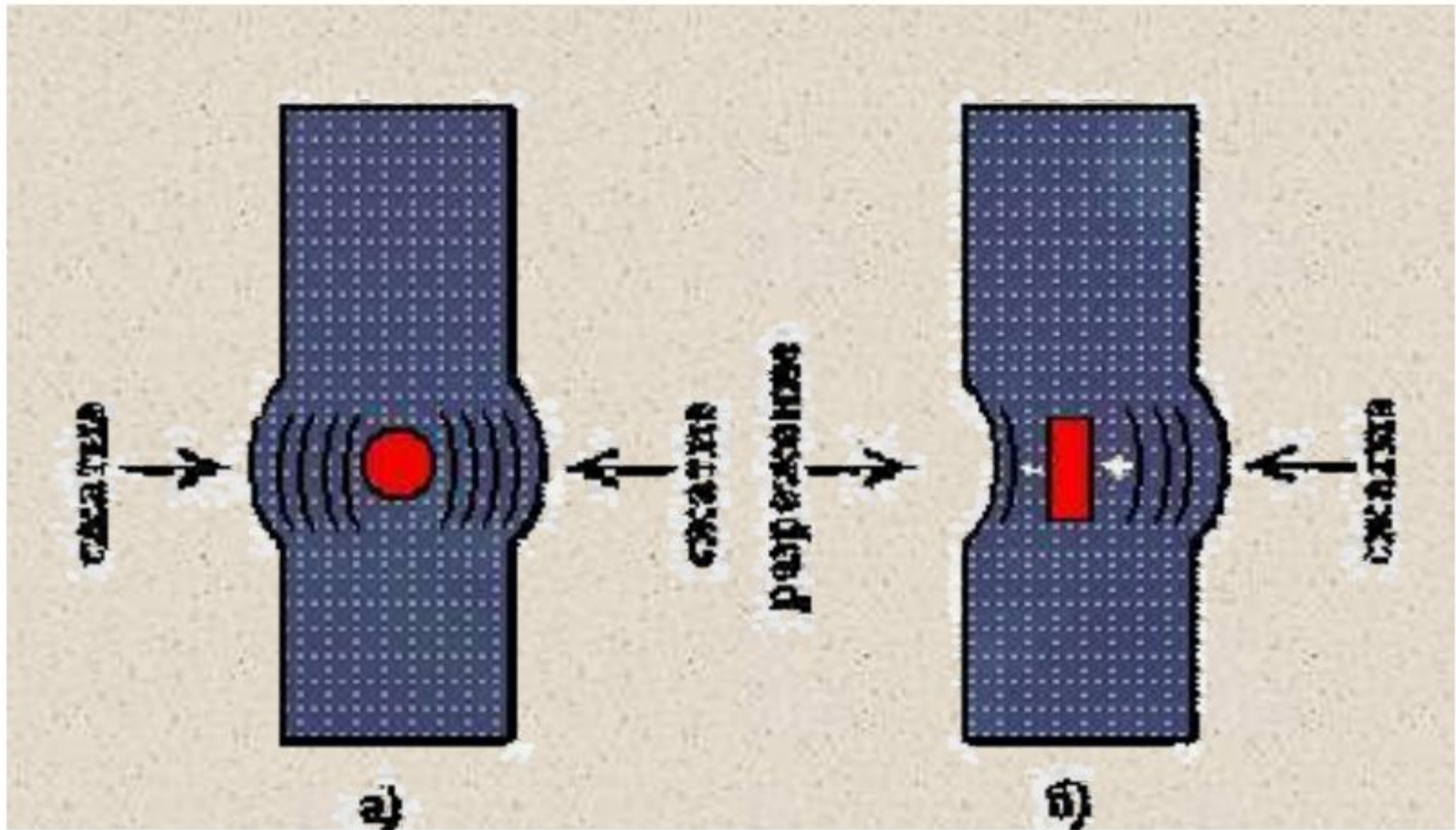
*В настоящее время в практике
волнового каротажа
информативными волнами, т.е.
нашедшими практическое
применение при решении геолого-
технических задач, являются три
волны:*

- ◎ продольная волна (P);*
- ◎ поперечная волна (S);*
- ◎ волна Стоунли (St).*

- ⊙ *Наиболее часто используемыми модулями являются:*
- ⊙ *модуль объёмного сжатия (K) – показатель сопротивляемости породы всестороннему сжатию, измеряется в паскалях (Па), и обычно имеет значение от 10 до 100 ГПа. Величина, обратная K , называется сжимаемостью;*
- ⊙ *модуль сдвига (G) – показатель сопротивляемости породы поперечному сдвигу, также измеряется в паскалях и имеет значения, примерно в 2 раза меньше, чем K ;*
- ⊙ *коэффициент Пуассона (ν). Величина ν – показатель пластичности породы, характеризующий изменения поперечных размеров элементарного объёма относительно продольной деформации при возникновении продольного сжатия.*

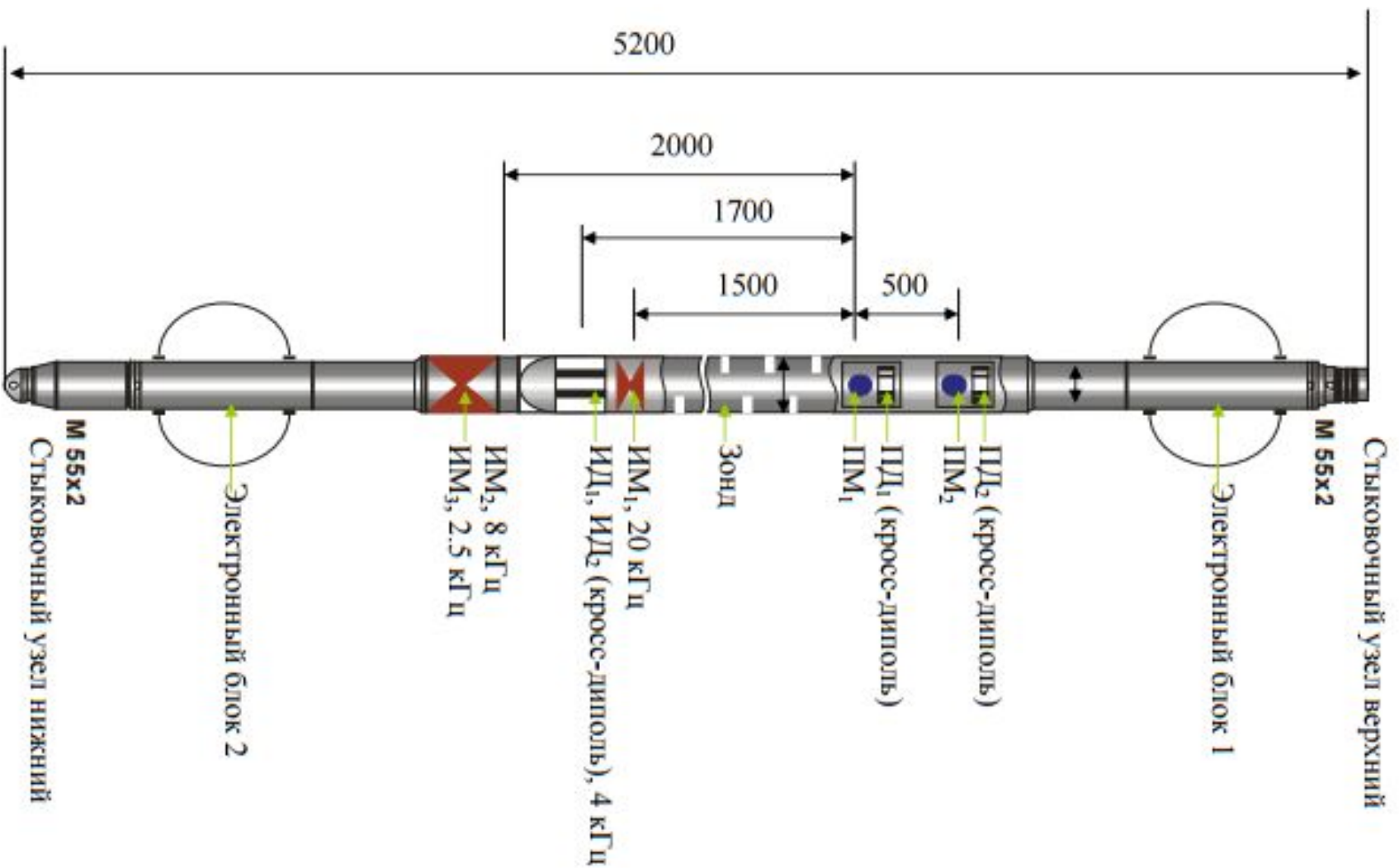
АППАРАТУРА ВАК-8





- ⊙ *Схематичное изображение акустического воздействия на стенку скважины монополярного а) и дипольного б) преобразователя.*

АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС АРАК-11



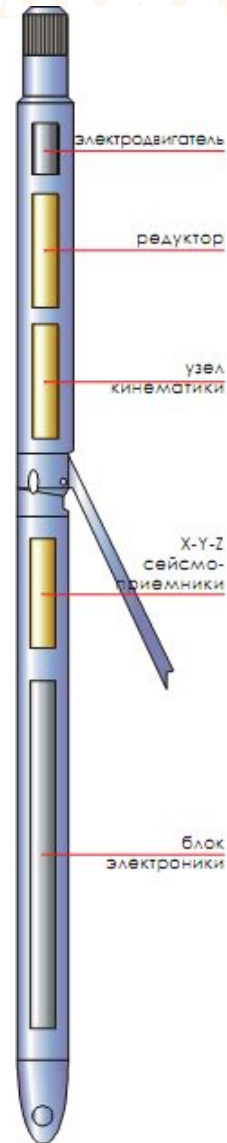
РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

- ◎ *определение прочностных характеристик среды;*
- ◎ *более детальное (по сравнению с АК) расчленение разреза и определение скоростей.*

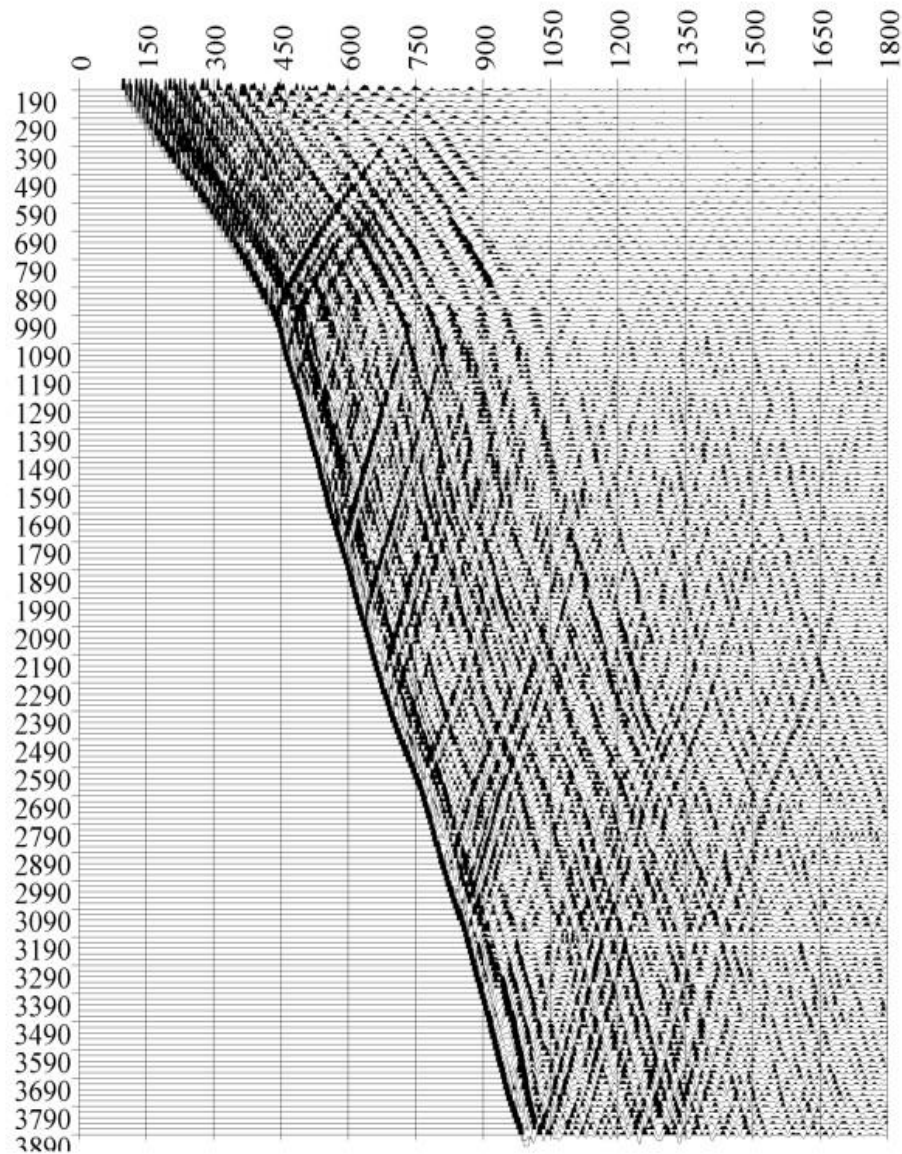
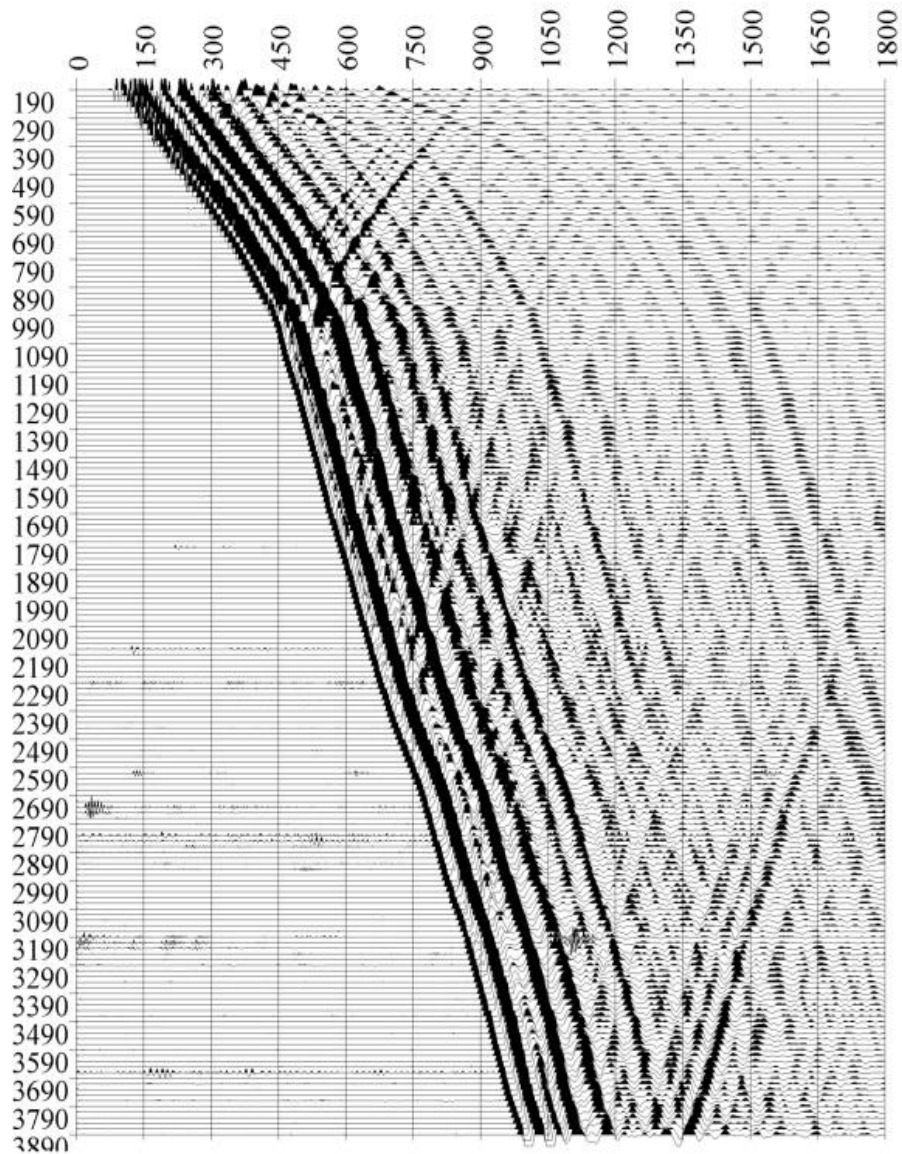
ВЕРТИКАЛЬНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ -ВСП

Вертикальное сейсмическое профилирование позволяет изучать геологическое строение и физические свойства околоскважинного пространства с использованием волн различных типов - продольных, поперечных, обменных, на основе анализа характеристик этих волн, скоростей их распространения, затухания, пространственной поляризации, характера анизотропии горных пород.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА



ПОЛУЧАЕМЫЕ ДАННЫЕ



ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- *Изучение скоростной характеристики разреза;*
- *Стратиграфическая привязка волнового поля отраженных волн к опорным горизонтам и продуктивным пластам во вскрытом геологическом разрезе;*
- *Выявление разрывных нарушений (в том числе малоамплитудных) и латеральных изменений литолого-фациальных свойств пластов;*

- *Уточнение структурных характеристик целевых интервалов разреза в околоскважинном пространстве.*
- *Прогнозирование геологического строения ниже забоя скважины;*
- *Прогнозирование зон аномально высоких пластовых давлений.*

ДОСТОИНСТВА

- ⊙ *практически полностью устранено влияние на сейсмограмму поверхностных волн, так как сейсмоприемники обычно расположены ниже области их регистрации;*
- ⊙ *первые вступления на сейсмограмме дают первое приближение истинной кинематической модели среды;*
- ⊙ *сигнал от возбуждения наблюдается в среде, а не на поверхности, что позволяет оценить и учесть его форму;*
- ⊙ *возможность точной увязки данных ГИС с данными наземной сейсморазведки.*

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1. Булатова Ж.М., Волкова Е.А., Дуброва Е.Ф. – Акустический каротаж. Недра, 1970 г.*
- 2. Гальперин Е.И. – Вертикальное сейсмическое профилирование, Недра, 1982 г.*
- 3. Валиуллин Р.Я. – Геофизические исследования и работы в скважине, том 1, 2010 г.*

